

УДК 551.465

## ТЕРМОКОСЫ ЮО ИО РАН: КОНСТРУКЦИЯ, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДАТЧИКОВ

© 2018 г. В. В. Очередник<sup>1</sup>, \*, В. И. Баранов<sup>1</sup>, А. Г. Зацепин<sup>1</sup>, С. Б. Куклев<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: v.ocherednik@ocean.ru

Поступила в редакцию 30.06.2017 г.

После доработки 18.12.2017 г.

Описана конструкция термокос, используемых на черноморском гидрофизическом полигоне ИО РАН, а также рассматриваются особенности их размещения на заякоренных буйковых станциях с подповерхностной плавучестью. Изложены методика калибровки температурных датчиков на термокосах и результаты исследования их стабильности путем сравнения получаемых калибровочных коэффициентов со значениями, установленными при предыдущих калибровках. Приводится описание характеристик термодатчиков, включая постоянную времени, а также погрешность их показаний относительно эталонного термометра. Выполненные метрологические исследования показали, что используемые в термокосах датчики температуры работают достаточно стабильно и проводят измерения с точностью в  $\pm 0.01^\circ\text{C}$  на протяжении нескольких месяцев работы в морских условиях. Это позволяет адекватно определять значения температуры на различных горизонтах в водной среде шельфово-склоновой зоны Черного моря и изучать не только их короткопериодную, но и долгопериодную изменчивость.

DOI: 10.1134/S003015741805009X

### ВВЕДЕНИЕ

Термическая стратификация вод деятельного слоя Черного моря является изменчивой в широком диапазоне временных масштабов: многолетнем, годовом, сезонном, внутрисезонном и короткопериодном [1]. Наименее изученной является короткопериодная изменчивость температурной стратификации, охватывающая временной диапазон от нескольких минут до нескольких суток. Эта изменчивость обусловлена действием целого ряда физических факторов, включающих ветровое воздействие, мезомасштабную и субмезомасштабную изменчивость динамики вод, внутренние волны и околоинерционные колебания, а также ряда других.

Одним из эффективных инструментов исследования как короткопериодной, так и долгопериодной изменчивости температурной стратификации являются так называемые “термокосы” [3, 4, 6, 7, 10]. Термокоса представляет собой гирлянду термодатчиков, способных обеспечивать долговременные регулярные измерения температуры в море на различных горизонтах. В частности, термокосы, изготавливаемые в Южном отделении Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ЮО ИО РАН), размещаются на заякоренных буйковых станциях и обеспечивают получение профилей температуры в верхнем 20–60-метро-

вом слое моря с высоким вертикальным (0.75–2 м) и временным (от 10 с) разрешением. Они уже несколько лет функционируют на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Голубой бухте, г. Геленджик [3], а данные их измерений используются для оценки изменчивости температурной стратификации вод черноморского шельфа [4, 5, 11].

Целью данной статьи является описание конструкции термокос, используемых на черноморском гидрофизическом полигоне ИО РАН, особенностей их размещения на заякоренных буйковых станциях с подповерхностной плавучестью, а также описание методики калибровки термодатчиков, результатов исследования стабильности их работы при долговременном использовании и определения их постоянной времени.

### КОНСТРУКЦИЯ ТЕРМОКОС И ИХ РАЗМЕЩЕНИЕ НА ЗАЯКОРЕННЫХ БУЙКОВЫХ СТАНЦИЯХ

Термокосы состоят из 20 и более термодатчиков и нескольких датчиков давления, сопряженных в едином корпусе с термодатчиками [3, 4]. Все датчики располагаются на одинаковом расстоянии друг от друга, которое варьируется в зависимости от длины термокосы в диапазоне 0.75–2 м. Все используемые на черноморском гидрофизическом полигоне ИО РАН термокосы

**Таблица 1.** Технические характеристики термодатчика Honeywell 700 серии (класса А)

Артикул производителя	700-101ВАА-В00
Тип датчика	Аналоговый, RTD 100
Диапазон рабочих температур	Class A: –30 to 300°C
Точность измерения	max. $R_0$ drift 0.04% after 1000 h at 500°C
Сопротивление изоляции	>100 МΩ at 20°C; >2 МΩ at 500°C
Потребляемый ток	100 Ω: 0.3 to 1.0 mA

размещаются на шельфе, на глубинах от 22 до 88 м на заякоренных буйковых станциях с подповерхностной плавучестью. В настоящее время на полигоне функционируют несколько термокос, установленных на внутреннем шельфе на удалении от берега около 1.5 км и глубине моря 22–27 м и вблизи бровки шельфа на удалении от берега около 7 км при глубине моря 84–88 м.

Конструкция термокос, технология изготовления корпусов (в т.ч., заливки датчиков самотвердеющим компаундом), система опроса и сбора данных, а также их электроника и программные решения за 4 года эксплуатации термокос претерпели значительные изменения. Это позволило существенно повысить надежность их долговременного функционирования и качество проводимых измерений.

В термодатчиках используется резистивный элемент фирмы Honeywell серии 700 с платиновым напылением на керамическую основу в качестве измерительного компонента. Технические характеристики датчика представлены в табл. 1. Датчик давления, позволяющий определять глубину своего нахождения с точностью 0.1% от общего диапазона измерений, представляет собой тензопреобразователь Д-2.5, серийно выпускаемый в г. Орле. При проведении многолетних измерений некоторую проблему может представлять долговременная нестабильность выходного сигнала датчика, которая по спецификации за 12 месяцев может составлять до 0.15% полного диапазона измерений.

Все активные элементы термокосы содержат микропроцессор со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Микропроцессор программируется на получение данных о температуре и гидростатическом давлении водной среды, а также на контроль напряжения питания батарейного блока и передачу данных измерений на основной модуль.

Электронная система термокосы работает в полудуплексном режиме связи [2] на двухпроводной токовой линии. Четырехжильный кабель обеспечивает питание и связь между основным модулем и измерительными датчиками.

Для обеспечения возможности работы термодатчиков и датчиков давления, их микропроцес-

соров и АЦП на глубине моря вплоть до 100 м была разработана методика герметизации измерительных модулей. Она производится в пресс-форме с использованием двухкомпонентного полиуретана, отвердевающего в течение двух часов после смешения компонентов. Следует отметить, что в процессе механического перемешивания полиуретана в смеси образуются воздушные пузырьки, которые ухудшают герметичность измерительных модулей. С “пузырьковым” дефектом было связано значительное число выходов из строя этих модулей в процессе их эксплуатации. В настоящее время пузырьки из модулей удаляются путем вакуумирования пресс-формы.

Термокосы, включающие в себя сами датчики, кабельные линии связи между ними и блок сбора информации, изготавливаются путем стыковки 2-х или 3-х секций, каждая из которых включает в себя 9 датчиков температуры и 1 сопряженный модуль с датчиками давления и температуры (рис. 1). Таким образом, двухсекционная цепочка датчиков вместе с блоком сбора информации имеет в своем составе 3 датчика давления, а трехсекционная – 4 датчика давления, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга. Совместные измерения температуры и давления на нескольких различных горизонтах позволяют судить об истинном положении термодатчиков и о наклоне буйрепа заякоренной буйковой станции, который, чаще всего, вызывается сильным течением.

Как уже указывалось выше, для проведения долговременных измерений вертикальных распределений температуры в верхнем (до 70 м глубины) слое моря термокоса размещается на заякоренной буйковой станции с подповерхностной плавучестью (рис. 2). При этом длина тросовой линии (буйрепа) выбирается так, чтобы подповерхностная плавучесть находилась на глубине 6–10 м от поверхности моря. Заглубление плавучести необходимо для уменьшения воздействия поверхностного волнения на заякоренную буйковую станцию. Однако это приводит к потере информации о температуре приповерхностного слоя моря. Поскольку толщина верхнего перемешанного слоя, как правило, превышает 6–10 м [9], практикуемое нами размещение термокос на заякоренных буйковых станциях позволяет адек-

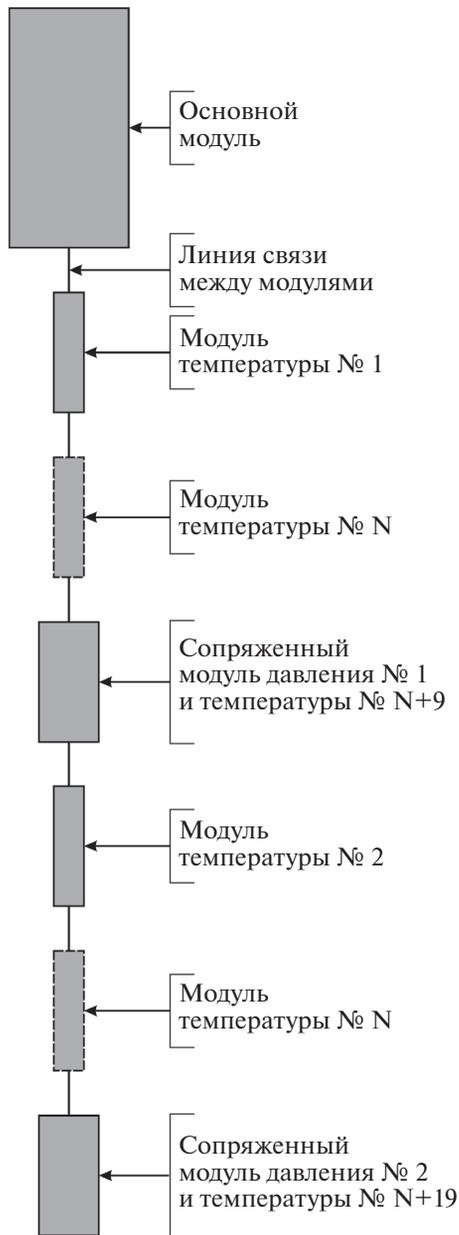


Рис. 1. Функциональная схема двухсекционной термокосы ЮО ИО РАН.

ватно измерять вертикальное распределение в сезонном термоклине и изучать, например, такие физические процессы как прибрежные апвеллинги и даунвеллинги [5, 11].

При постановке в море буйковой станции с термокосой (рис. 2) в ее верхней части к тросовой линии прикрепляется плавучесть (подповерхностный буй), внизу – донный якорь (основной и малый на отводном фале). При этом термокоса крепится к тросовой линии без натяжения кабеля, что позволяет предотвратить ее обрывы при постановке и подъеме станции, а также при дер-

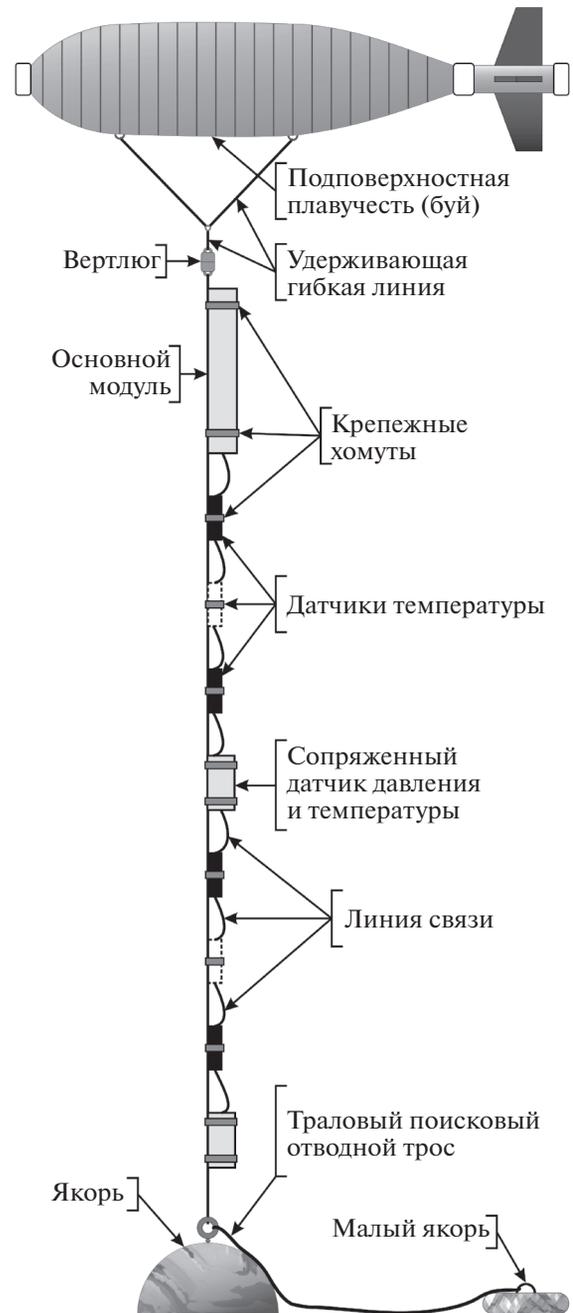


Рис. 2. Схема заякоренной буйковой станции с термокосой, прикрепленной к тросовой линии станции.

гания тросовой линии штормовым волнением (рис. 3).

На рис. 4 изображены конструкции используемых подповерхностных плавучестей. В настоящее время применяются два типа плавучестей, представляющие собой гондолы обтекаемой формы, а именно: пенопластовые и состоящие из заполненных воздухом и герметично закрытых пластиковых труб (пластиковые плавучести).

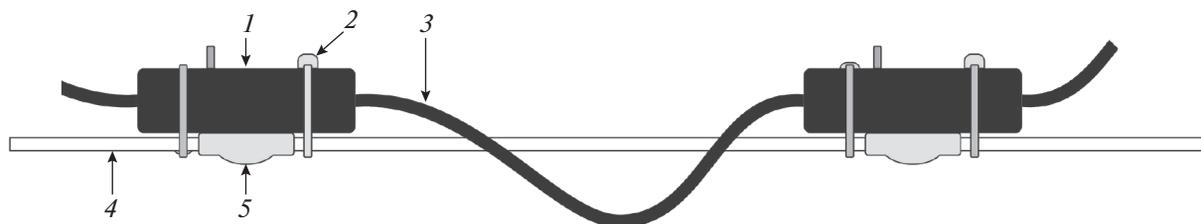


Рис. 3. Расположение датчиков на тросовой линии: 1 – датчик, 2 – фиксирующий хомут, 3 – кабельная линия связи, 4 – тросовая линия в оплетке, 5 – нержавеющий тросовый зажим (для фиксации датчиков на тросовой линии).

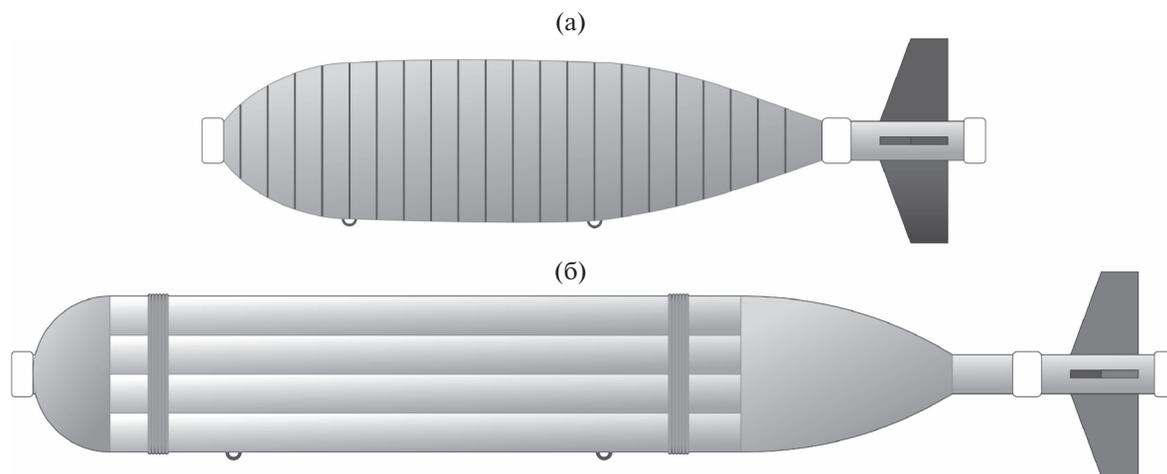


Рис. 4. Подповерхностные плавучести: (а) – пенопластовые; (б) – пластиковые.

Пластиковые плавучести изготавливаются из герметизированных ПВХ труб диаметром 76 мм, которые почти не деформируются под давлением и позволяют сохранять грузоподъемность при погружении на глубины 30 м и более.

Выталкивающая сила плавучести составляет несколько десятков килограммов (до 80 кг). Она приблизительно в два раза меньше веса якоря, однако существенно больше веса тросовой и кабельной линии вместе с датчиками. Благодаря этому тросовая линия находится в натянутом состоянии. Обтекаемая форма подповерхностной плавучести, значительный положительный баланс ее подъемной силы позволяют удерживать косу в квазивертикальном положении даже при наличии довольно сильного течения.

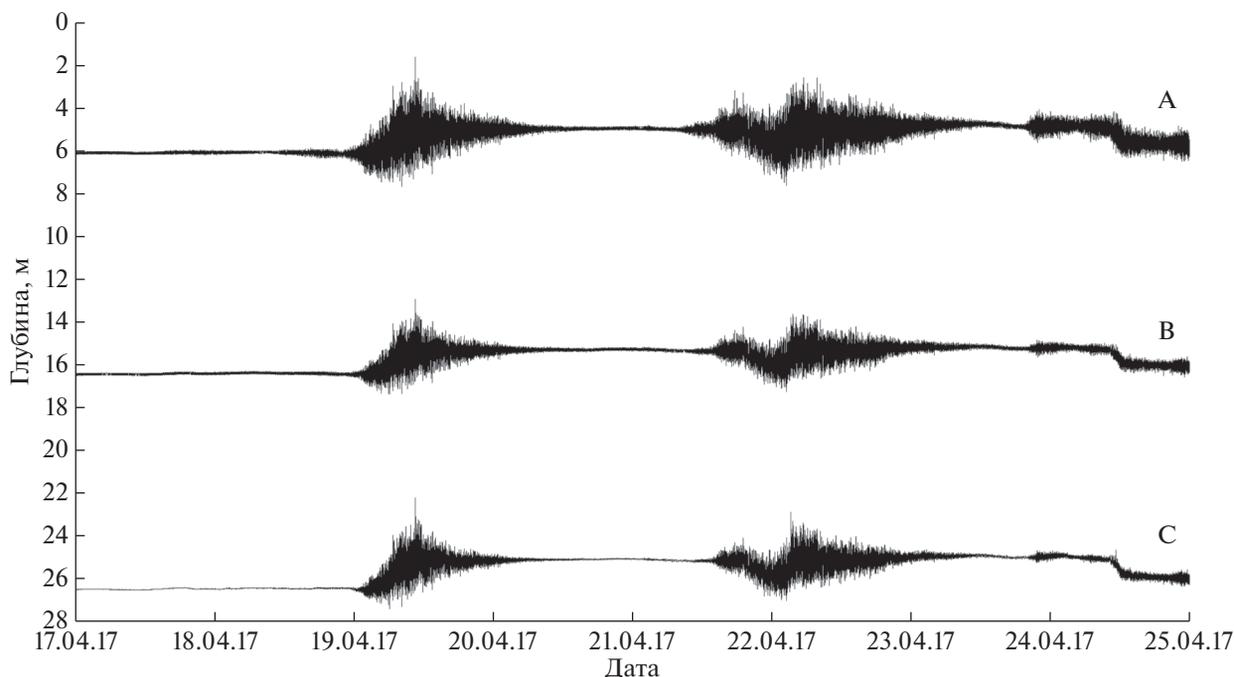
При небольших глубинах постановки (до 100 м) поиск станции осуществляется методом судового траления кошки, которая зацепляет фал (отводной конец) между основным и малым якорями. За этот конец станция поднимается на борт судна.

Как уже указывалось, одним из опасных явлений, влияющих на работу термокос, является штормовое волнение. Чтобы уменьшить его воздействие на буйковую станцию с термокосой, при постановке станции плавучесть заглубляется на

6–10 м от морской поверхности [9]. Тем не менее, сильные шторма, сопровождающиеся волнами большой амплитуды, дергают плавучесть. При недостаточном весе якоря под волновым воздействием станция с термокосой может приподниматься от дна и смещаться по направлению распространения волн и течения, что было зафиксировано весной 2017 г. при прохождении нескольких штормов (рис. 5): первый шторм с 19:00 18 апреля по 00:00 20 апреля; второй шторм с 19:00 21 апреля по 22:00 23 апреля; третий шторм с 00:00 24 апреля по 12:00 25 апреля. Вследствие этого станция изменила место постановки. Сильные рывки буйрепа могут вызвать его разрыв или отрыв плавучести, что грозит потерей всей станции.

#### КАЛИБРОВКА ТЕРМОДАТЧИКОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ТЕРМОДАТЧИКОВ ИЗ СТРОЯ

Термодатчики, как и любое другое измерительное оборудование, при долговременном использовании требуют периодического метрологического обслуживания, включающего калибровку (тарировку), при которой производится приведение отсчетов АЦП датчиков к физиче-



**Рис. 5.** Пример регистрации смещения заякоренной буйковой станции с термокосой во время трех штормов: А – подповерхностный сопряженный датчик температуры и давления; В – межсекционный сопряженный датчик температуры и давления; С – сопряженный датчик температуры и давления в нижней точке термокосы.

ским единицам путем сравнения с эталоном измерения, а также сопоставление тарировочных коэффициентов с результатами предыдущих калибровок. Проводить метрологические исследования требуется для анализа погрешности и стабильности измерений температуры в море, осуществляемых термокосами. Необходимым элементом этих исследований являются также наблюдение за старением термодатчиков, изучение причин и статистики их фатальных выходов из строя.

Стандартный срок постановки заякоренной буйковой станции с термокосой составляет 3–4 мес. После работы в море с термокосами проводятся регламентные работы, включающие метрологические исследования температурных датчиков. Эти исследования позволили получить некоторые характеристики процесса старения термодатчиков. При этом под процессом старения термодатчиков резистивного типа принимают изменение нулевого сопротивления с течением времени, т.е. сопротивления, которое имеет датчик при 0°C [8].

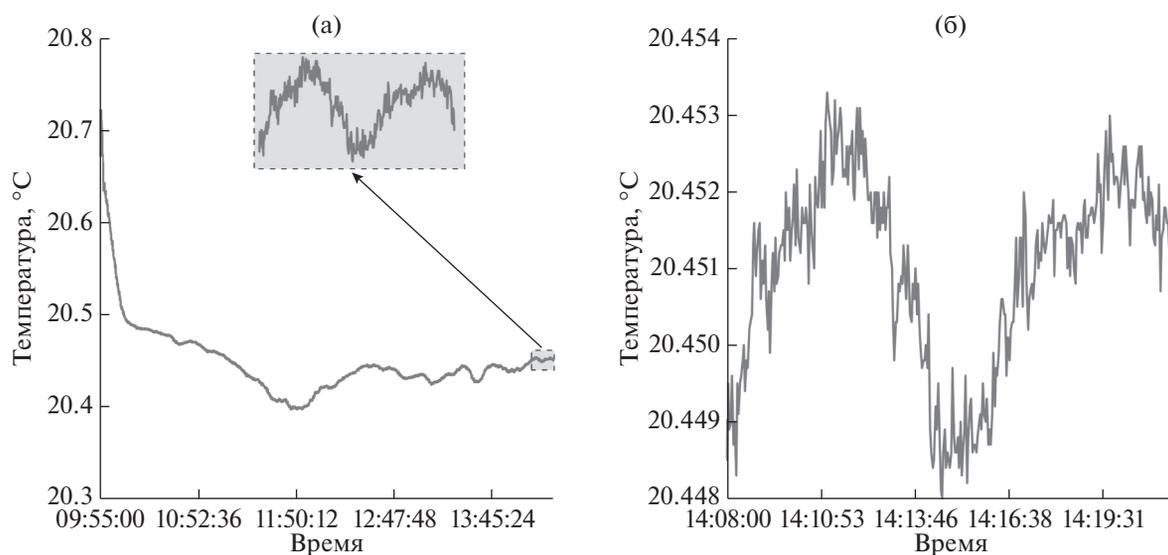
Метрологические исследования и калибровка термокос проводятся в термостате ТВП-6 советского производства (1983 г.). Рабочей жидкостью этого термостата является дистиллированная вода. Технические характеристики термостата ТВП-6 приведены в табл. 2.

Данный термостат относится к типу переливных термостатов. Он имеет два резервуара, в первом из которых происходит интенсивное перемешивание и стабилизация температуры воды, а во втором находится калибруемая термокоса. При помощи гидронасоса жидкость внутри системы термостата переливается из внутреннего резервуара во внешний. За счет непрерывного тока воды вертикальный градиент температуры практически отсутствует. Другими словами, однородность температурного поля достигается путем интенсивной циркуляции водной среды, поддерживаемой гидронасосом, и непрерывного турбулентного перемешивания, создаваемого системой водорассекающих перфопластин.

Контроль температурного поля в термостате происходит при помощи термометров, расположенных на разных горизонтальных уровнях в термостабильной емкости, куда и погружается при тарировке термокоса. Неоднородность поля оценивается путем вычисления разности показаний термометров, расположенных в разных частях термостата.

При высоте емкости термостата  $h = 400$  мм и максимальной неоднородности распределения температуры в различных его частях равной 0.03°C пространственный градиент температуры в термостате не превышает  $7.5 \times 10^{-4}$ °C/см.

При тарировке в термостат погружается термокоса таким образом, чтобы температурные дат-



**Рис. 6.** Выход температуры рабочей жидкости в термостате на заданный уровень с течением времени: (а) — общий вид записи; (б) — фрагмент записи, выделенный серым прямоугольником, в укрупненном масштабе.

чики не соприкасались измерительными элементами со стенками переливной емкости и создавали минимальное сопротивление потокам жидкости в системе. В центре рабочей области устанавливается эталонный термометр ПТС-100, который опускается в воду на глубину не менее 300 мм. Со временем температура среды в системе термостата стабилизируется благодаря автоматической системе термостабилизации. Диапазон точности поддержания установленной на термостате температуры при метрологических исследованиях реально составлял  $0.003\text{--}0.005^\circ\text{C}$  (рис. 6). После выхода рабочей жидкости на уровень заданной температуры запускается программа регистрации и производится запись показаний эталонного платинового термометра (ПТ) и термодатчиков (Т) в течение 10–30 мин. Затем задается новое значе-

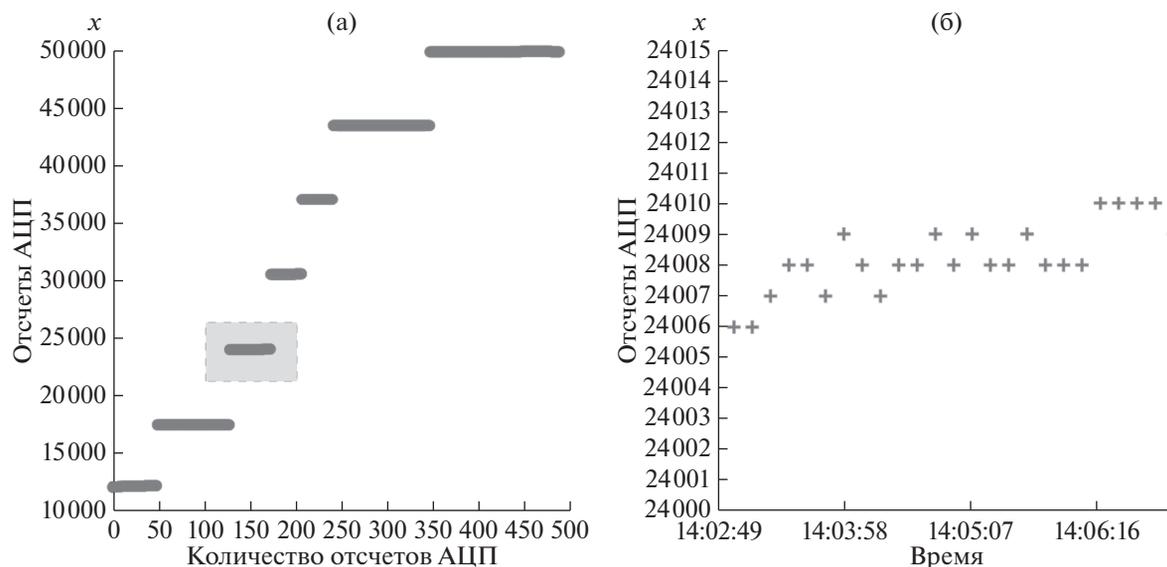
ние температуры рабочей жидкости, производится ее изменение и т.д.

Из рис. 6а следует, что стабилизация температуры в термостате занимает продолжительное время. Во время термостабилизации, как видно из увеличенного фрагмента (рис. 6б), температура не отклоняется более чем на указанные выше значения и удерживается в интервале времени, достаточном, чтобы все датчики приняли заданную температуру.

Как показано на рис. 6б, путем изменения температуры рабочей жидкости в термостате и его последующей термостабилизации последовательно проходятся температурные контрольные точки, по которым происходит калибровка датчиков (рис. 7а, 7б). При этом температура изменяется от низких значений до более высоких

**Таблица 2.** Технические характеристики термостата ТВП-6

Диапазон установки температуры ( $\text{H}_2\text{O}$ )	0–100°C
Диапазон регулирования температуры	0–90°C
Стабильность поддержания температуры	$\pm 0.01^\circ\text{C}$
Неравномерность распределения температуры в различных частях термостата	$\pm 0.03^\circ\text{C}$
Мощность нагревателя	2 кВт
Электропитание	220/240 В, 50/60 Гц
Рабочий объем	70000 $\text{cm}^3$
Насос:	
– максимальная производительность	20000 $\text{cm}^3/\text{мин}$
– максимальное давление нагнетания	475 мбар
– максимальное разрежение всасывания	330 мбар
– ступени мощности насоса	3



**Рис. 7.** Пример калибровки одного из датчиков: (а) – температурные “полки”; (б) – фрагмент записи данных измерений на одной из полок, выделенной на рис. ба) серым прямоугольником, в увеличенном масштабе;  $x$  – отсчеты АЦП, отложенные на оси ординат.

(рис. 7а), что обусловлено более быстрым процессом нагрева рабочей жидкости по сравнению с ее охлаждением. Интервал изменения температуры рабочей жидкости от одной калибровочной точки к другой составляет около  $5^{\circ}\text{C}$  при полном диапазоне ее изменения  $1\text{--}30^{\circ}\text{C}$ . Данные измерений на каждой калибровочной точке укладываются на горизонтальную “полку”, а из самих полок формируются “ступени” (рис. 7а). При рассмотрении “полки” под большим увеличением видны небольшие колебания температуры, даже если датчик уже надежно принял заданную температуру окружающей среды (рис. 7б).

Обработка полученных данных проводится по завершению регистрации данных измерений, выполненных во всем диапазоне изменчивости температуры по следующей схеме:

- для каждой “полки” рассчитывается среднее значение показаний термодатчика;
- определяется максимальное отклонение показаний от среднего значения за время регистрации;
- с учетом данных, полученных на всех “полках”, рассчитываются коэффициенты полинома третьего порядка  $f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$ , где  $x$  – показания термодатчика (отсчет АЦП), а  $f(x) = T^{\circ}\text{C}$ , где  $T$  – ряд значений температуры на эталонном термометре ПТС-100, которые приравниваются соответствующим значениям температуры калибруемого (поверяемого) датчика;

Полином третьего порядка во всем исследуемом диапазоне изменения температуры от  $1$  до  $30^{\circ}\text{C}$  обеспечивает погрешность ее определения в

$\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ . Оказалось, что использование полиномов более высоких порядков, нецелесообразно, т.к. они не дают существенного повышения точности аппроксимации [8].

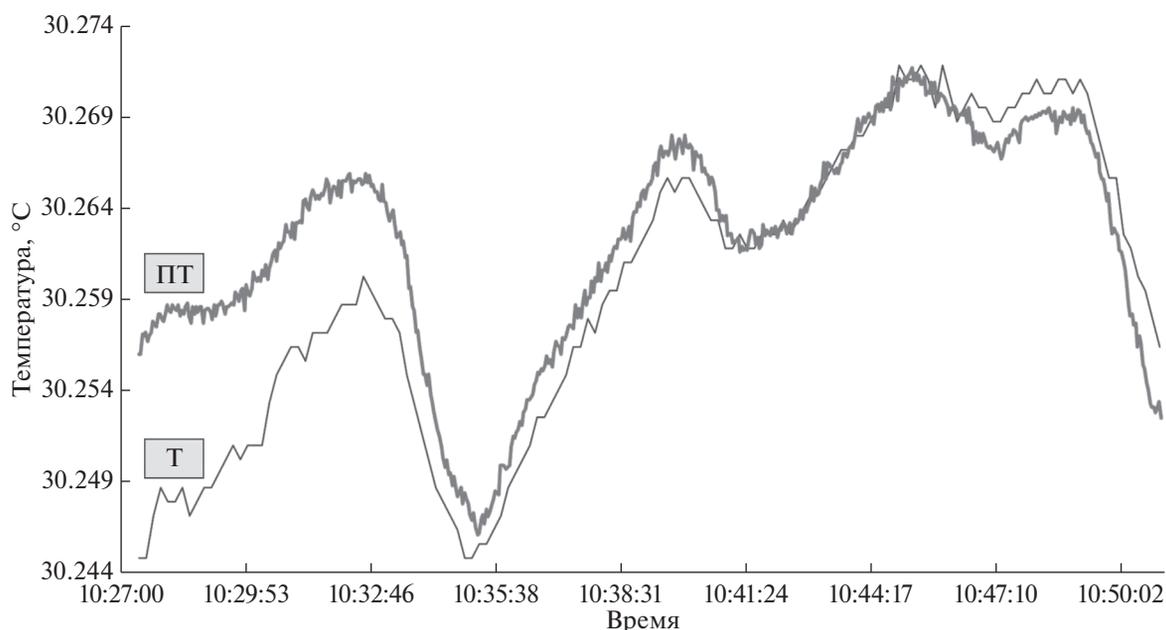
Рис. 7а является примером представления данных измерений одного из датчиков термокосы в диапазоне от  $1$  до  $30^{\circ}\text{C}$  при калибровочном интервале около  $5^{\circ}\text{C}$ . Рисунок 7б представляет собой масштабированное изображение одной температурной полки. Из рис. 7а и 7б видно, что при числе  $1100 \pm 100$  ед. отсчетов АЦП на  $1^{\circ}\text{C}$  показания датчика колеблются в диапазоне 5 ед. Это соответствует погрешности  $\pm 0.0055^{\circ}\text{C}$ , что близко к указанному ранее значению погрешности.

При сравнении данных измерений температуры эталонного и тарированного датчиков после применения полученных коэффициентов к отсчетам АЦП и приведении их к физическим единицам (рис. 8) видно, что максимальное отклонение между эталонным термометром и поверяемым составляет не более  $0.01^{\circ}\text{C}$ .

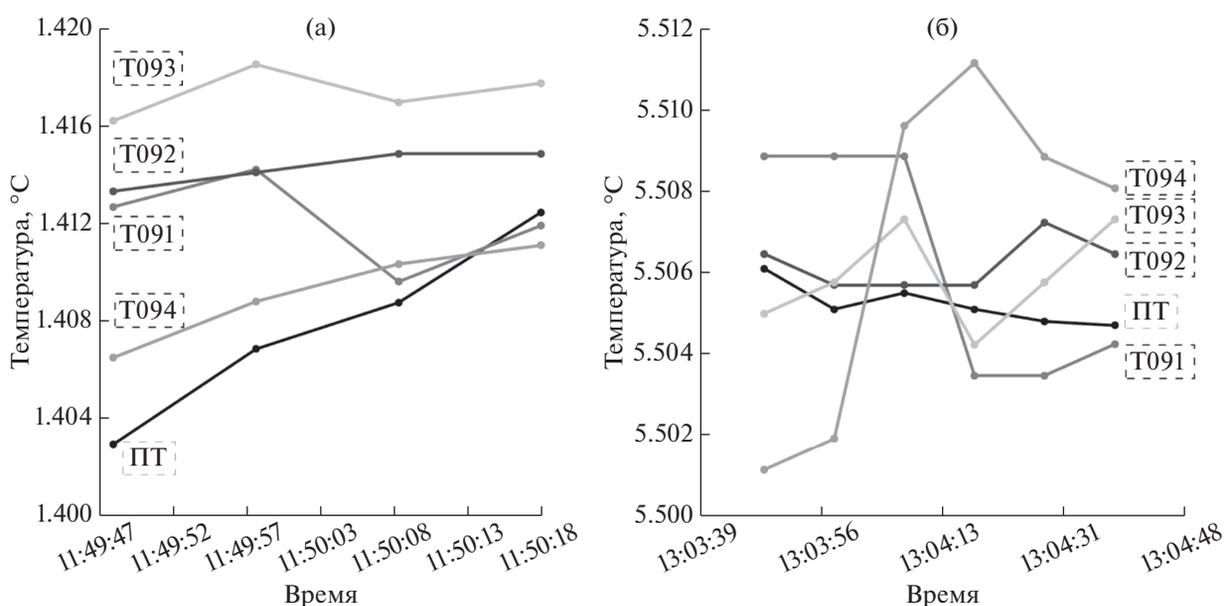
Синхронизировав время измерений нескольких термодатчиков и эталонного термометра (рис. 9а, 9б), можно видеть примерно ту же погрешность измерений в  $10^{-2}^{\circ}\text{C}$ .

Данная процедура применяется ко всем исследуемым датчикам при всех метрологических поверках для выявления возможных отклонений от значений температуры, измеренных эталонным термометром.

Каждая термокоса калибровалась перед постановкой в море на буйковой станции и после ее снятия с буйковой станции. Для каждого датчика



**Рис. 8.** Примеры регистрации температуры эталонным термометром (ПТ) и калибруемым датчиком (Т) после определения коэффициентов аппроксимации данных калибровки полиномом третьей степени.



**Рис. 9.** Примеры измерений температуры несколькими датчиками в термостате (Т091–Т094) в сравнении с эталонным термометром (ПТ) с регистрацией каждые 10 с: (а) – при температуре рабочей жидкости 1.4°C; (б) – при температуре рабочей жидкости 5.5°C.

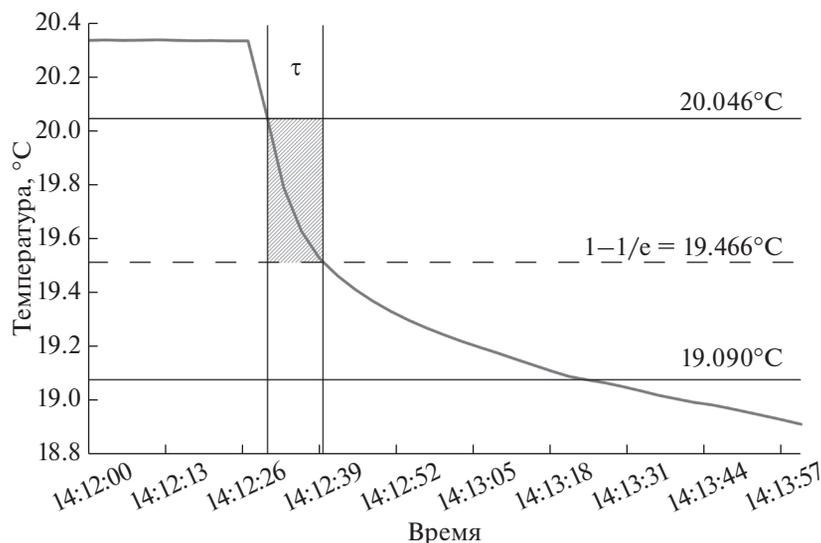
калибровочные коэффициенты, полученные до и после нахождения термокосы в море, сопоставлялись друг с другом, вычислялась их разность. После этого вводились поправки на временные изменения калибровочных коэффициентов в предположении их линейного дрейфа. В табл. 3 показана разность значений температуры, рассчитанных при применении коэффициентов, по-

лучаемых с интервалом в 4 мес. и более года. Из данной таблицы видно, что при применении коэффициентов, относящихся к разным моментам времени, результат не превышает заданную точность  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ .

Наряду с погрешностью измерения важной характеристикой термодатчиков является их постоянная времени. Для ее определения регистрирую-

**Таблица 3.** Разность тарировочных характеристик датчика, полученных до и после их работы в морских условиях

Дата и время измерений	АЦП датчика	Дата проведения тарировок				Разность тарировочных характеристик датчика									
		температура, °С				A	B	C	D	A-B	A-C	A-D	B-C	B-D	C-D
		20.07.15	05.11.15	16.03.16	18.04.17										
25.09.2016 20:15	23647	9.30959	9.31211	9.30633	9.30854	0.00252	-0.00326	-0.00105	-0.00578	0.00857	-0.00221				
25.09.2016 20:17	23646	9.30884	9.31135	9.30557	9.30778	0.00251	-0.00327	-0.00106	-0.00578	0.00857	-0.00221				
25.09.2016 20:19	23657	9.31716	9.31968	9.31392	9.31611	0.00252	-0.00324	-0.00105	-0.00576	0.00857	-0.00219				
25.09.2016 20:21	23583	9.26115	9.26363	9.2578	9.2601	0.00248	-0.00335	-0.00105	-0.00583	0.00853	-0.0023				
25.09.2016 20:23	23627	9.29446	9.29696	9.29117	9.2934	0.0025	-0.00329	-0.00106	-0.00579	0.00856	-0.00223				
25.09.2016 20:25	23585	9.26267	9.26514	9.25932	9.26161	0.00247	-0.00335	-0.00106	-0.00582	0.00853	-0.00229				
25.09.2016 20:27	23591	9.26721	9.26969	9.26387	9.26615	0.00248	-0.00334	-0.00106	-0.00582	0.00854	-0.00228				
25.09.2016 20:29	23673	9.32926	9.3318	9.32605	9.32822	0.00254	-0.00321	-0.00104	-0.00575	0.00858	-0.00217				
25.09.2016 20:31	23683	9.33683	9.33938	9.33363	9.33579	0.00255	-0.0032	-0.00104	-0.00575	0.00859	-0.00216				
25.09.2016 20:33	23687	9.33986	9.34241	9.33667	9.33882	0.00255	-0.00319	-0.00104	-0.00574	0.00859	-0.00215				
25.09.2016 20:35	23708	9.35574	9.35832	9.35259	9.35471	0.00258	-0.00315	-0.00103	-0.00573	0.00861	-0.00212				
25.09.2016 20:37	23725	9.3686	9.3712	9.36548	9.36758	0.0026	-0.00312	-0.00102	-0.00572	0.00862	-0.0021				
25.09.2016 20:39	23734	9.37541	9.37802	9.37231	9.3744	0.00261	-0.0031	-0.00101	-0.00571	0.00862	-0.00209				
25.09.2016 20:41	23727	9.37011	9.37271	9.367	9.3691	0.0026	-0.00311	-0.00101	-0.00571	0.00861	-0.0021				
25.09.2016 20:43	23709	9.3565	9.35908	9.35335	9.35547	0.00258	-0.00315	-0.00103	-0.00573	0.00861	-0.00212				



**Рис. 10.** Запись переходного процесса от одного значения температуры к другому при быстром перемещении датчика из воздуха в воду с целью определения постоянной времени термодатчиков.

щий элемент (термодатчик) быстро (за секунду) переносился из теплой воды в более холодную с регистрацией измеряемых значений с частотой 3 Гц. Переходный процесс изменения температуры датчика изображен на рис. 10.

Постоянная времени термодатчика определялась на основе уравнения:

$$T - T_0 = (T_1 - T_0)\exp(-t/\tau). \quad (1)$$

Здесь  $T$  — текущее значение температуры датчика,  $T_1$  — значение температуры в первой среде,  $T_0$  — значение температуры во второй среде,  $t$  — текущее время,  $\tau$  — постоянная времени датчика.

При  $t = \tau$   $T - T_0 = (T_1 - T_0)/2.72$ , или:  $(T - T_0)/(T_1 - T_0) = 0.37$ .

Проводя горизонталь на этом уровне до точки пересечения с экспонентой, находим постоянную времени как разность между начальным моментом времени и моментом времени достижения уровня 0.37 от начальной разницы температуры между средами.

Полученная таким образом постоянная времени  $\tau \approx 10$  с.

### ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ФАТАЛЬНЫХ ВЫХОДОВ ТЕРМОДАТЧИКОВ ИЗ СТРОЯ

При долговременных постановках в море на заякоренной буйковой станции, в особенности, в штормовой период (осенний и зимний сезоны года) на надежность работы термокосы в целом влияют переломы соединительных кабелей у оснований входа/выхода датчиков, а также качество герметизации корпусов датчиков. При некачественной герметизации под давлением в несколь-

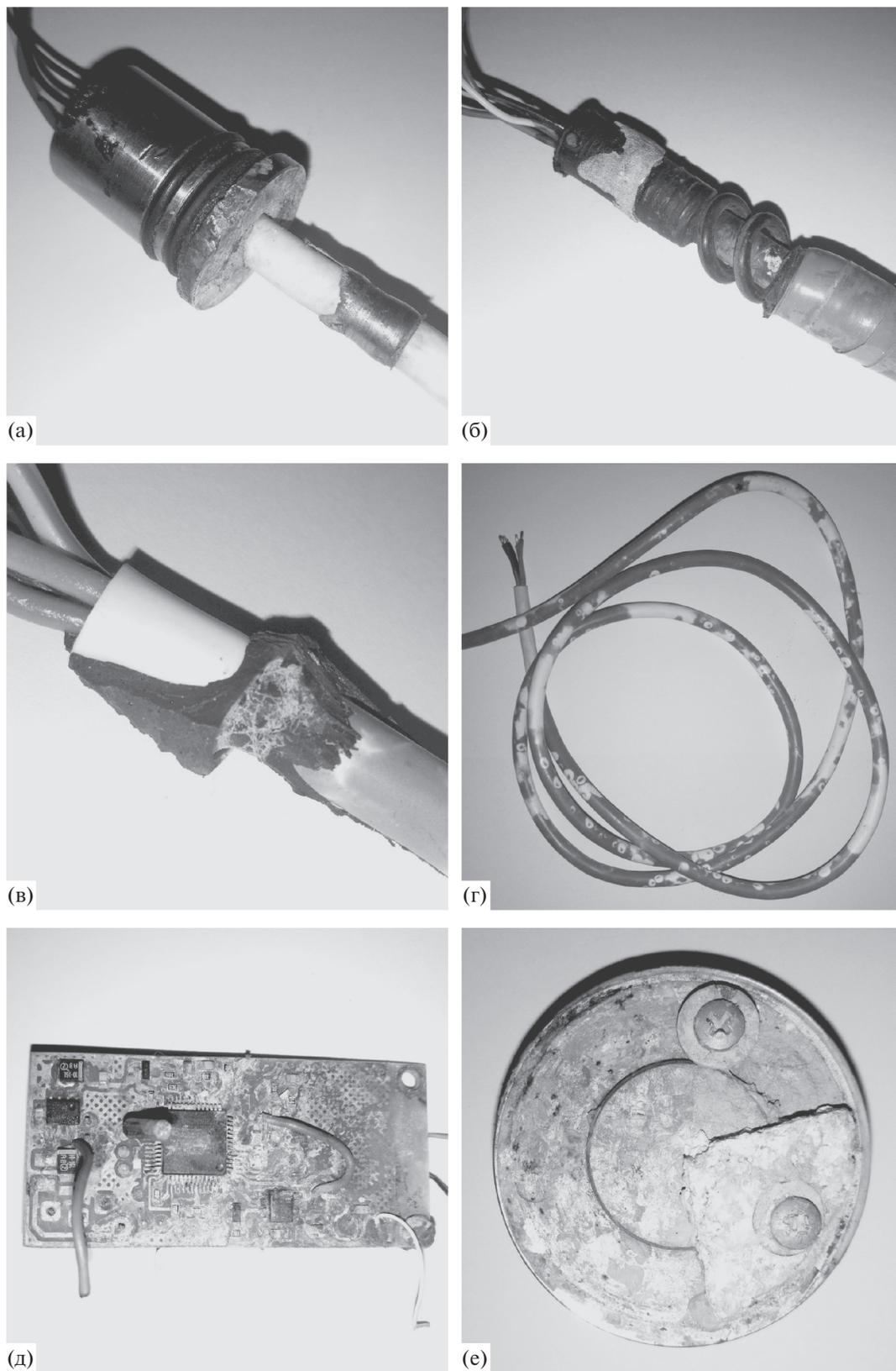
ко децибар вода проникает внутрь корпуса и вызывает короткое замыкание, что в первую очередь выводит из строя стабилизатор питания, а следом и процессор термодатчика, после чего такие датчики уже не подлежат восстановлению. Кроме того, при воздействии давления на корпус датчика может возникать короткое замыкание вследствие уменьшения зазоров между корпусом термодатчика и электронной платой.

Помимо перечисленных выше причин, на работу датчиков оказывают влияние микроорганизмы. Они проникают в зазоры на участках стыковки полиуретановой заливки и линии связи и образуют в этих местах свои колонии, что приводит к порче материала и способствует проникновению воды в корпус термодатчика. Такие случаи были зафиксированы при долговременном функционировании термокос в летний период, являющийся временем активного размножения морской биоты.

На рис. 11 представлены фотографии реальных повреждений термокос, а также герморазъемов на соединительных кабелях между ними.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метрологические и натурные исследования показали, что термокосы, разработанные в ЮО ИО РАН, в настоящее время функционируют достаточно стабильно и производят измерения с погрешностью  $\pm 0.01^\circ\text{C}$  на протяжении 3–4 мес. непрерывной работы. Это позволяет достаточно адекватно определять значения температуры на различных горизонтах в морской среде. Тем не менее, дальнейшее совершенствование измерительной базы, ее электронной и механической со-



**Рис. 11.** Герморазъемы, разрушенные в процессе электролиза (а, б); отслоение полиуретана от кабеля в следствии активности микроорганизмов (в); следы колоний баянусов (усоногих раков) на кабеле, в виде “окружностей и потемнений” (г); окисление и деформация платы датчика давления в следствии разгерметизации корпуса (д); внешняя поверхность гермопробки датчика давления с цинковым протектором от коррозии (е).

ставляющих позволит увеличивать энергоемкость и, соответственно, период непрерывной работы термокос. При постановке в комплексе с донными доплеровскими профилографами скорости течения термокосы позволяют связать изменчивость термической стратификации с динамикой вод шельфа. При постановке кластера близкорасположенных термокос можно проводить измерение внутренних волн в термоклине, включая их амплитуду, направление и скорость их распространения, а также связь со штормами, течением и вихрями. Такого рода исследование планируется выполнить в ближайшем будущем.

В.В. Очередник, В.И. Баранов и С.Б. Куклев выполняли работу в рамках темы Госзадания 0149-2018-0013, А.Г. Зацепин – по теме Госзадания 0149-2018-0003. Натурные эксперименты проводились при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-50-00095. Обработка и анализ данных выполнялись при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-45-230781. Подготовка статьи к публикации выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-35-50030.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А. и др. Изменчивость гидрофизических полей в Черном море. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
2. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога. М.: Издательский дом “Додэка-XXI”, 2002. 384 с.
3. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и др. Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Изв. РАН. Физ. атм. и океана. 2014. № 1 С. 16–29.
4. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Куклев и др. Текущее состояние и развитие гидрофизического полигона Института океанологии РАН в шельфово-склоновой зоне российского сектора Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. Вып. 27. С. 71–76.
5. Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Куклев С.Б. и др. Наблюдение цикла интенсивного прибрежного апвеллинга и даунвеллинга на гидрофизическом полигоне ИО РАН в Черном море // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 188–199.
6. Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.
7. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2009. № 5. С. 72–79.
8. Моисеева Н.П. Исследование влияния процесса окисления платины на характеристики эталонных платиновых термометров сопротивления // Измерительная техника. 1996. № 7. С. 41–44.
9. Подымов О.И., Зацепин А.Г. Сезонная и межгодовая изменчивость солёности верхнего слоя в Геленджикском районе Черного моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 370–383.
10. Серебряный А.Н., Химченко Е.Е. Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря летом 2013 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 88–104.
11. Сильвестрова К.П., Зацепин А.Г., Мысленков С.А. Прибрежные апвеллинги в Геленджикском районе Черного моря: связь с ветровым воздействием и течением // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 1–10.

## Thermochains SB IO RAS: Design, Methodology and Results of Metrological Investigation of Sensors

V. V. Ocherednik, V. I. Baranov, A. G. Zatsepin, S. B. Kyklev

The thermochains for the Black Sea hydrophysical testing are described, and also the features of their placement on mooring with subsurface buoyancy are considered. A technique of calibration of temperature sensors are described by comparing the obtained calibration coefficients with the values established in previous calibrations. Characteristics of temperature sensors, including the time constant, as well as the error of their readings relative to the reference thermometer are described. Performed metrological studies showed that the temperature sensors used in the thermochains work quite stably and carry out measurements with an accuracy of  $\pm 0.01^\circ\text{C}$  for several months of operation in marine conditions. This allows to adequately determine the temperature at various horizons in the water environment of the shelf-slope zone of the Black Sea and to study not only their short-period, but also long-term variability.