

## Термопрофилемер для измерения вертикального распределения температуры в верхнем 100-метровом слое моря и его испытания в Арктическом бассейне

П. В. Гайский \*, И. Е. Козлов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\* e-mail: gaysky@inbox.ru*

### Аннотация

Описаны технические и методические аспекты разработки экспериментального образца распределенного датчика температуры – термопрофилемера. Измеритель создан для исследований термической приповерхностной структуры морской среды в Арктике, включая контроль вертикальных профилей температуры по глубине, обнаружение термоклина и определение параметров внутренних волн. Длина термочувствительной части датчика, построенной на базе непрерывных пространственно-модулированных проводников, составляет 48 м. Пространственно-осредненное разрешение – 1.5 м. Датчик может использоваться в статическом и динамическом режимах измерений, включая зондирование и буксировку. Контроль заглубления измерительной части осуществляется с помощью гидростатических датчиков давления, расположенных на концах датчика. Специализированное программное обеспечение измерителя осуществляет отображение измерительной информации в виде мгновенных профилей температуры, а также динамики изолиний температуры с привязкой к пространству и времени в телеметрическом режиме и при постобработке. По пространственному положению и смещению рассчитанных изолиний по глубине во времени обеспечивается автоматический контроль местонахождения термоклина, амплитуды и периода внутренних волн. Экспериментальный образец измерителя использовался в арктических исследованиях 2021 г.

**Ключевые слова:** распределенный датчик температуры, термопрофилемер, изотерма, теплозапас, термоклин, внутренние волны, поле температуры, теплообмен, термокоса

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0004 (создание термопрофилемера) и гранта РФФИ № 21-17-00278 (выполнение натурных измерений внутренних волн в Арктике).

© Гайский П. В., Козлов И. Е., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)  
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

**Для цитирования:** Гайский П. В., Козлов И. Е. Термопрофилемер для измерения вертикального распределения температуры в верхнем 100-метровом слое моря и его испытания в Арктическом бассейне // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 1. С. 137–145. EDN CWVFVA. doi:10.29039/2413-5577-2021-3-137-145

## **Thermoprofilemeter for Measuring the Vertical Temperature Distribution in the Upper 100-Meter Layer of the Sea and its Testing in the Arctic Basin**

**P. V. Gaisky \*, I. E. Kozlov**

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

*\* e-mail: gaysky@inbox.ru*

### **Abstract**

The paper describes the technical and methodological aspects of development of an experimental sample of a distributed temperature sensor. The thermoprofilemeter is created for Arctic studies of the thermal near-surface structure of marine environment, including vertical temperature profiles, detection of thermocline and internal waves. The temperature-sensitive part of the sensor built on the basis of continuous spatially modulated conductors measures 48 m. The spatial-averaged resolution is 1.5 m. The sensor can be used in static and dynamic measurement modes, including sounding and towing. Control of the depth of the measuring part is carried out using hydrostatic pressure sensors located at the ends of the sensor. The specialized software provides the display with measuring information in the form of instantaneous temperature profiles as well as in the form of the dynamics of temperature isolines with reference to depth and time, in telemetric mode and during post-processing. The calculated isolines provide automatic control of the spatial vertical displacement of the thermocline, and the amplitude and period of internal waves. An experimental sample of the device was used in Arctic studies in 2021.

**Keywords:** distributed temperature sensor, thermoprofilemeter, isotherm, heat storage, thermocline, internal waves, temperature field, heat exchange, termistor chain.

**Acknowledgements:** The research was performed under state assignment on topic no. 0555-2021-0004 (creation of the thermoprofilemeter) and RSF grant no. 21-17-00278 (*in situ* measurements of internal waves in the Arctic Ocean).

**For citation:** Gaisky, P.V. and Kozlov, I.E., 2023. Thermoprofilemeter for Measuring the Vertical Temperature Distribution in the Upper 100-Meter Layer of the Sea and its Testing in the Arctic Basin. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 137–145. EDN CWVFVA. doi:10.29039/2413-5577-2021-3-137-145

### **Введение**

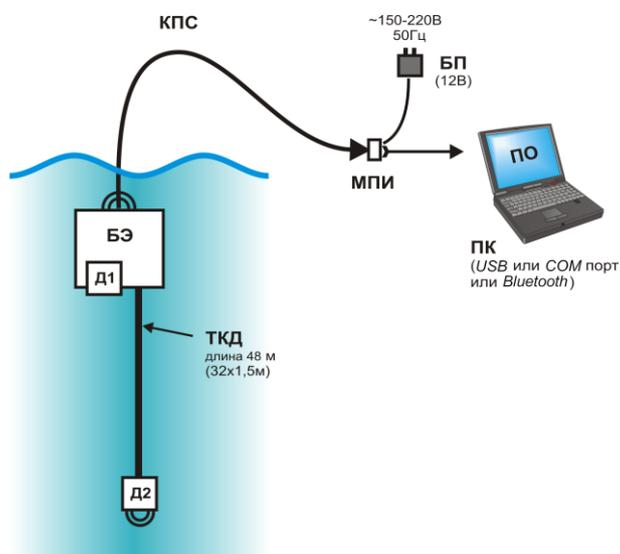
Исследования динамики температурных изменений в водной среде Арктического региона приобретают все большую актуальность вследствие активного освоения региона и развития климатических аномалий [1, 2]. Наряду с задачами контроля теплозапаса и процессов теплообмена в водной среде возникает необходимость качественного изучения переноса, распределения и динамики перемешивания водных масс с учетом течений, внутренних волн

[3–7] и других явлений гидрологической, метеорологической, геологической и антропогенной природы.

Одним из инструментов таких исследований являются распределенные датчики температуры – пространственно дискретные термокосы [8–10] и распределенные термопрофилемеры [11, 12]. При повышенных требованиях к точности и быстродействию измерений в ряде случаев термопрофилемеры являются предпочтительными. Работа термопрофилемеров основана на опросе аналоговых проводниковых датчиков. Следовательно, при соответствующей метрологической градуировке и реализации электронных схем первичного измерительного преобразователя, в отличие от серийных цифровых аналогов, термопрофилемеры могут успешно работать в широком диапазоне температур. Конструктивно термопрофилемеры могут иметь адаптивное пространственное разрешение. Опрос всех распределенных датчиков в термопрофилемере осуществляется одновременно. Опыт использования термопрофилемеров в экспедиционных исследованиях показал их надежность как в телеметрическом применении, так и в длительных автономных постановках. Поскольку электроника измерителя рассчитана на рабочие диапазоны температуры от  $-40$  до  $+60$  °С, а механические нагрузки на термочувствительный кабель-датчик ограничиваются его конкретным техническим исполнением (грузонесущей защиты и оболочки), то термопрофилемер может вполне успешно применяться в сезонных рабочих условиях арктических исследований.

### Аппаратура

Поскольку основной целью измерений проектируемого датчика являются температурные процессы в Арктическом регионе, происходящие на глубинах до 100–150 м, то идеальным распределенным измерителем вертикальных мгновенных профилей температуры был бы датчик соответствующей длины. Был изготовлен экспериментальный измеритель длиной 48 м из 32 распределенных участков по 1.5 м. Контроль внутренних волн на границе обнаруженного термоклина с залеганием глубже 50 м предполагается осуществлять с использованием измерителя в буксируемо-зондирующем режиме (за счет запаса кабель-троса). При условии прямолинейности тела датчика его ориентация по вертикали и привязка температурных измерений по глубине контролируются с помощью датчиков гидростатического давления, расположенных в крайних верхней и нижней точках измерителя. При изготовлении измерительных каналов давления использовались датчики *Honeywell MLH300PSL06A*. При изготовлении температурной сенсорной части использовались медные проводники (провод ПЭВТЛ-2  $\varnothing$  0.18 мм), уложенные по ортогональным функциям [11, 12] в защитной полиамидной трубке  $\varnothing$  6–10 мм с параллельным внутренним грузонесущим стальным тросом. Погружной микроконтроллерный блок электроники обеспечивает коммутацию каналов и аналого-цифровое преобразование измерительной информации с передачей первичных кадров данных через кабель-трос на бортовое компьютерное устройство по стандартному последовательному интерфейсу RS232/485. Корпус электронного блока выполнен из нержавеющей стали и полиацетали (POM-C). Структурная схема и общий вид измерителя представлены на рис. 1 и 2 соответственно.



Р и с . 1 . Структурная схема измерителя  
 F i g . 1 . Device block diagram



Р и с . 2 . Общий вид измерителя  
 F i g . 2 . General view of the device

- Основной состав измерителя включает:
- термочувствительный погружной кабель-датчик (ТКД);
  - погружной блок электроники (БЭ);
  - встроенные в БЭ и ТКД датчики гидростатического давления (Д1 и Д2), рассчитанные для глубин до 200 м (показания до 100 м);
  - соединительный кабель питания и связи (КПС);



Р и с . 3 . Вид и подключение модуля преобразования интерфейсов (МПИ)

F i g . 3 . Interface conversion module view and connection

- модуль преобразования интерфейсов (МПИ);
- внешний блок преобразования и стабилизации питания из  $\sim 220$  В в 12 В (БП);
- специализированное программное обеспечение для первичной регистрации и обработки данных измерителя для персонального компьютера ПК (ПО).

Для обеспечения универсальности подключения измерителя к компьютерному устройству был разработан мультиинтерфейсный модуль (рис. 3), который обеспечивает возможность использования стандартных портов *COM*, *USB* и *Bluetooth* (через виртуальный *COM*) на выбор.

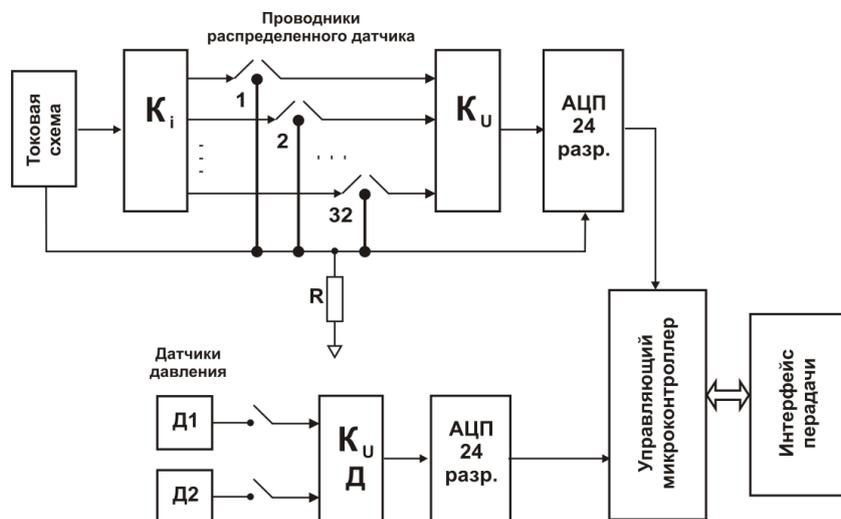
### Результаты

Функциональная схема разработанного электронного модуля измерителя представлена на рис. 4. Измерительные каналы прибора опрашиваются в коммутационном режиме. Для проводников распределенного датчика используется параллельная токово-потенциальная коммутация ( $K_i$  и  $K_u$ ). Датчики давления опрашиваются отдельным коммутатором ( $K_uД$ ). Аналого-цифровое преобразование осуществляется с помощью 24-разрядного сигма-дельта преобразователя фирмы *Analog Devices*.

Функциональная схема МПИ представлена на рис. 5. В этом модуле используются готовые решения преобразования интерфейсов, стандартные драйверы и доступные системные возможности настройки и подключения внешних устройств к ПК.

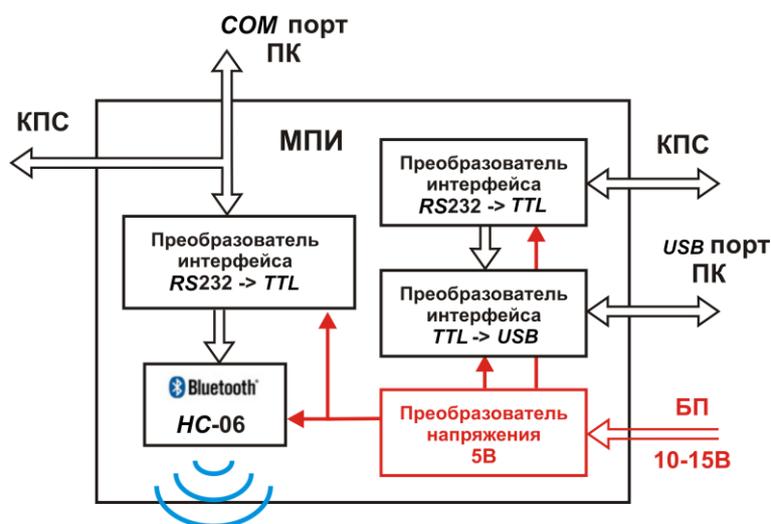
Специализированное программное обеспечение для регистрации, обработки и отображения данных измерителя <sup>1)</sup> функционирует в операционных системах *MS Windows*.

<sup>1)</sup> Программа для регистрации и обработки измерительных данных термопрофилемеров «THERMOPROF» / П. В. Гайский ; МГИ. Электрон. дан. Севастополь, 2022. № гос. регистрации 2022611315.



Р и с . 4. Функциональная схема блока электроники (БЭ) измерителя

F i g . 4. Functional diagram of the device electronics unit



Р и с . 5. Функциональная схема модуля преобразования интерфейсов (МПИ)

F i g . 5. Interface conversion module functional diagram

По результатам метрологических поверок, а также исходя из установленных техническим заданием требований были сформулированы технические и метрологические характеристики экспериментального образца прибора:

- длина ТКД – 48 м;
- количество участков – 32 шт.;
- осредненное пространственное разрешение ТКД – 1.5 м;
- период измерения профиля и ориентации по глубине (частота опроса) – 2 с;

- погрешность измерения осредненной на участке ТКД температуры –  $\pm 0.1$  °С в диапазоне от 0 до +25 °С;
- погрешность измерения глубины в точках установки датчиков давления (Д1 и Д2) – 0.1 дБа (0.1 м) в диапазоне от 0 до 100 м;
- цифровое разрешение по температуре – 0.0007 °С;
- цифровое разрешение по давлению – 0.00008 дБа;
- средняя инерционность ТКД в жидкости – 30 с;
- энергопитание погружной части (ТКД и БЭ) по КПС – постоянное напряжение от 10 до 15 В (до 2 Вт);
- длина КПС – 40÷100 м;
- масса измерителя (ТКД, БЭ, КПС, МПИ, БП) – до 15 кг;
- внешние размеры измерителя в комплекте для упаковки – 0.6 × 0.6 × 0.2 м.

На рис. 6 представлен фрагмент записей измерений, проведенных в глубинной акватории во время арктической экспедиции [13]. Результат отображается в виде изолиний температуры вертикального профиля с привязкой к глубине и времени. Разработанный термопрофилемер использовался в буксире-зондирующем режиме с борта судна. На рисунке отчетливо видны колебания изотермических поверхностей. Наиболее выражено колебание изотерм 4 и 6 °С с 11:10 до 11:20 высотой около 30 м в слое 10–50 м, которое,

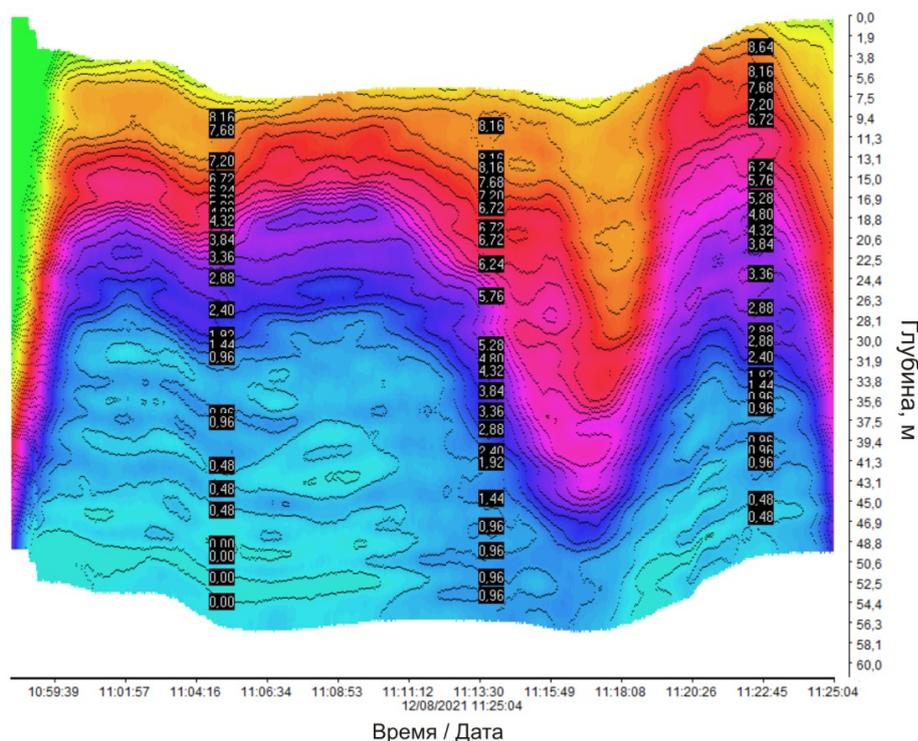


Рис. 6. Пример записи измерений датчиком в Арктике в буксире-зондирующем режиме в изолиниях температуры

Fig. 6. Example of measurement recording by a sensor in the Arctic in towed-sounding mode in temperature isolines

согласно предположению авторов, ассоциируется с прохождением короткопериодной внутренней волны в районе измерений. В процессе этого эксперимента судно переместилось на 1 км со средней скоростью дрейфа 66.7 см/с. Максимальное зондирование по глубине по данным датчиков давления, расположенных на концах измерителя, осуществлялось до +7 м к длине термопрофилемера. Измерительная система в телеметрическом режиме отслеживала заглубление термопрофилемера и положение термоклина, а алгоритмы контроля пространственных смещений изолиний – амплитуду и период внутренней волны. В то же время на картинке хорошо видна тепловая инерционность распределенного датчика в первые 20 секунд после погружения. Очевидно, что при оценке данных наблюдений в динамических режимах и при наличии градиентов ее необходимо учитывать. Для объективного анализа длин обнаруживаемых внутренних волн необходим одновременный контроль скорости заборных течений.

### **Заключение**

Разработанный экспериментальный образец измерителя прошел первичные натурные испытания и обеспечил исследователей в экспедиционных работах качественной оперативной информацией. Дальнейшая модернизация конструкции измерителя позволит увеличить механическую нагрузочную способность кабеля-датчика и общую надежность. С учетом технической модификации рассматриваются дополнительные методы применения термопрофиломеров для арктических исследований, включая автономную установку и возможности длительных измерений в буксируемом режиме.

Результаты измерений, полученные с помощью термопрофиломеров, характеризуются большей точностью и меньшей дискретностью (как временной, так и пространственной) по сравнению с распространенными термоподвесками, выполненными в виде гирлянды цифровых датчиков температуры. Специализированные программные алгоритмы обеспечивают оперативность в наглядном отображении телеметрической измерительной информации.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке / В. В. Иванов [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 1. С. 13–25. EDN TKYDXO.
2. Состояние и перспективы развития системы мониторинга гидрологических условий акватории Северного Ледовитого океана / И. М. Ашик [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68, № 1. С. 8–25. EDN RGTQLD. doi:10.30758/0555-2648-2022-68-1-8-25
3. Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А. Свободные короткопериодные внутренние волны в арктических морях России // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 6. С. 645–658. EDN PJTDAA. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-645-658
4. Свержун Е. И., Зимин А. В., Жегулин Г. В. Наблюдения внутренних волн второй моды в Белом и Баренцевом морях // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 185–195. EDN ZBAISA. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-185-195
5. Морозов Е. Г., Пака В. Т. Внутренние волны в высокоширотном бассейне // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 709–715. EDN MVSGVV.

6. Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Карском море по данным спутниковых радиолокационных измерений / И. Е. Козлов [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 44–59. EDN UDEYRL. doi:10.7868/S0205961415040053
7. Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений / И. Е. Козлов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 4. С. 338–345. EDN TJELGP.
8. Термокосы ЮО ИО РАН: конструкция, методика и результаты метрологического исследования датчиков / В. В. Очередник [и др.]. Океанология. 2018. Т. 58, № 5. С. 719–730. EDN XWVHWH. doi:10.1134/S003015741805009X
9. Николаев Н. И., Васильева Н. В., Николаева И. В. Разработка устройства для удаленного мониторинга температурной среды «термокоса» // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 11. С. 17–23. EDN НУИЈСТ.
10. Толстошеев А. П., Лунев Е. Г., Мотыжев С. В. Анализ результатов натурных экспериментов с термопрофилирующими дрейфующими буями в Черном море и других районах мирового океана // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 5. С. 9–32. EDN TECAWR.
11. Гайский В. А., Гайский П. В. Распределенные термопрофилемеры и их возможности в океанографических исследованиях // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 6. С. 46–76.
12. Гайский В. А., Гайский П. В. Использование распределенных датчиков для температурных измерений в море. Севастополь : ИПТС. 2018. 222 с. doi:10.33075/978-5-6040795-4-6
13. Исследование внутренних волн большой амплитуды в проливе Карские ворота в августе 2021 г. / И. О. Копышов [и др.] // Морские исследования и образование: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Тверь, 25–29 октября 2021 года. Тверь : ООО «ПолиПРЕСС», 2021. Т. 3. С. 238–241. EDN UCQRPY.

Поступила 18.08.2022 г.; одобрена после рецензирования 11.10.2022 г.; принята к публикации 01.02.2023 г.; опубликована 24.03.2023 г.

*Об авторах:*

**Гайский Павел Витальевич**, заведующий лабораторией инновационного морского приборостроения, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат технических наук, **Scopus Author ID: 7801588003**, **SPIN-код: 7789-0658**, *gaysky@inbox.ru*

**Козлов Игорь Евгеньевич**, заведующий лабораторией морских полярных исследований, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6378-8956**, **ResearcherID: G-1103-2014**, **Scopus Author ID: 49963767500**; **ID РИНЦ: 705937**, *ik@mhi-ras.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Гайский Павел Витальевич** – разработка и изготовление измерителя, разработка программного обеспечения

**Козлов Игорь Евгеньевич** – испытание измерителя в арктической экспедиции, анализ измерительных данных

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*