

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МОРСКИХ УСТЬЯХ РЕК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CTD-ЗОНДА

Д. А. АНТОНЕНКОВ

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия,
dmitry_science@mail.ru*

Аннотация. Рассматриваются особенности применения CTD-зондов для исследования процессов взаимодействия речных и морских вод в устьях рек. Приведены результаты экспедиционных исследований гидродинамических процессов в устье реки Черной, полученные с помощью данных технических средств. Представлена методика выполнения экспериментов и приведены основные характеристики применяемого оборудования. Использование современных CTD-зондов позволяет получать информацию о распределении основных гидрологических параметров водной среды (удельной электропроводности и температуры) в натурных условиях, что необходимо при моделировании гидрологического режима устьев рек.

Ключевые слова: CTD-зонд, устье реки, соленость, датчики, температура, эксперименты

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005 „Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей“ (шифр „Прибрежные исследования“).

Ссылка для цитирования: Антоненков Д. А. Экспериментальные исследования гидрологических процессов в морских устьях рек с использованием CTD-зонда // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 7. С. 535—540. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-535-540.

EXPERIMENTAL STUDIES OF HYDROLOGICAL PROCESSES IN SEA ESTUARIES USING CTD PROBE

D. A. Antonenkov

*Marine Hydrophysical Institute of the RAS, Sevastopol, Russia,
dmitry_science@mail.ru*

Abstract. Several features of using CTD probes to study the processes of interaction of river and sea waters in river estuaries are considered. The results of expedition studies of hydrodynamic processes at the estuary of the Chernaya River (Sevastopol) obtained with the help of these technical means are demonstrated. The method of performing experiments and the main characteristics of the equipment used are presented. The use of modern CTD probes allows obtaining information about the distribution of the main hydrological parameters of the aquatic environment (electrical conductivity and temperature) in natural conditions, which is necessary when modeling the hydrological regime of river estuaries.

Keywords: CTD probe, river estuary, salinity, sensors, temperature, experiments

Acknowledgment: the work was carried out within the framework of the state task on the topic No. 0555-2021-0005 "Complex interdisciplinary studies of oceanological processes that determine the functioning and evolution of ecosystems of the coastal zones of the Black and Azov Seas" (code "Coastal research").

For citation: Antonenkov D. A. Experimental studies of hydrological processes in sea estuaries using CTD probe. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 7. P. 535—540 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-7-535-540.

Введение. В настоящее время в условиях глобального изменения климата и постоянного роста антропогенной нагрузки на прибрежные территории, а также сокращения сети гидрологических постов, в том числе и их отсутствия в устьях рек, требуется разработка новых методов изучения гидрологических процессов, протекающих в устьевых зонах [1, 2]. Для этой цели в основном используется гидродинамическое моделирование [3, 4]. Однако для

получения репрезентативных результатов необходимы качественные натурные данные, полученные с помощью специальных стационарных исследований и выполнения комплексных экспедиционных работ.

Для описания гидрологических процессов, обусловленных смешением морских и речных вод, одними из наиболее важных параметров являются удельная электропроводность (расчетная соленость) и температура воды. Для получения таких данных в настоящее время активно используются STD-зонды различных фирм-производителей [5—7]. STD-зонд — это оборудование для измерения таких параметров, как температура, давление и электропроводность водной среды на разных глубинах.

Цель настоящей статьи — разработка методики использования STD-зондов для исследований гидродинамических процессов в зонах смешения морских и речных вод в устьях малых рек и апробация методики в ходе экспедиционных исследований на полигоне в устье реки Черной (Севастополь).

Экспедиционные исследования и методика выполнения натурных экспериментов. В практике экспедиционных исследований растет спрос на метрологически обеспеченные натурные данные, в частности данные автоматизированных средств измерения основных параметров воды, которые обеспечивают STD-зонды. В основном такие зонды используются для мониторинга и исследования термохалинной структуры вод Мирового океана. Значение термина „термохалинный“ определяется его составом: „термо“ — температура, „халин“ — соленость; эти два фактора вместе определяют плотность водной среды. STD-зонды дают достаточно точную и всестороннюю картину распределения и изменения температуры, солености и плотности воды [8]. Основные датчики, входящие в состав стандартного STD-зонда, — датчик температуры, измеритель электропроводности и датчик давления. Датчик температуры обеспечивает измерения в месте расположения прибора в толще воды и используется для определения солености. Измеритель электропроводности измеряет проводимость, т.е. электрический ток, который может проходить через толщу воды; с помощью нескольких вычислений и ввода показаний датчика температуры определяется соленость. Давление, которое зависит от глубины, измеряется соответствующим датчиком [9]. В итоге, после того как зонд опускается в воду, в его память записываются показания различных датчиков, и далее с помощью бортовых вычислений и обработки данных на выходе получают значения температуры, солености и плотности с привязкой к глубине.

Применение STD-зондов при работах в области смешения морских и речных вод в устьях рек позволяет исследовать структуру разнородных потоков, прогнозировать возможные изменения состояния устьев рек под влиянием природных и антропогенных факторов.

При проведении комплексных экспедиционных исследований в районе р. Черной была разработана и апробирована методика выполнения натурных экспериментов с использованием STD-зонда для устьев рек. В работах использовался созданный в Морском гидрофизическом институте (МГИ) РАН (Севастополь), гидрозонд ГАП-АК-12Р [10], внешний вид которого представлен на рис. 1.



Рис. 1

Технические характеристики гидрозонда ГАП-АК-12Р

Диапазон измерений температуры, °С	От –2 до +38
Цена единицы наименьшего разряда температуры, не более, °С	0,01
Пределы погрешности канала температуры	
при доверительной вероятности 0,95, не более, °С	±0,03
Диапазон измерений электрической проводимости, о.е.:	
1-й диапазон	От 0 до 0,9
2-й диапазон	От 0,6 до 1,5
Цена единицы наименьшего разряда	
электрической проводимости, не более, о.е.	2,5·10 ^{–4}
Пределы погрешности электрической проводимости	
при доверительной вероятности 0,95, о.е.	±7,5·10 ^{–4}
Диапазон измерений гидростатического давления, МПа	От 0 до 2,5
Цена единицы наименьшего разряда гидростатического давления, МПа	6,25·10 ^{–4}
Пределы погрешности гидростатического давления	
при доверительной вероятности 0,95, МПа	±6,25·10 ^{–3}

Методика выполнения натурных экспериментов с использованием зонда заключалась в последовательном выполнении ряда этапов.

1. Выбор положения створов, измерительных станций и их количества в устье. Закрепление створов и станций на местности. При выборе створов учитывались существующие гидротехнические сооружения и особенности рельефа местности.

2. Выполнение промерных работ с использованием лотлиня, эхолота для определения максимальной глубины на станции и последующего назначения измерительных горизонтов. В связи с небольшими глубинами в устье реки шаг между горизонтами составлял 0,1 м.

3. Измерения методом зондирования в автономном режиме. На каждой станции производилось измерение с выдержкой прибора на горизонте 30—60 с. Прибор находился полностью в воде, постепенно погружаясь до соприкосновения с дном.

4. Обработка полученных данных с помощью разработанного в МГИ программного обеспечения. На данном этапе осуществлялась выборка данных и определялись основные характеристики водной среды — температура, соленость.

Одновременно с измерениями гидрозондом проводились метеорологические наблюдения — измерение направления и скорости ветра, наблюдения за температурой окружающего воздуха. Для исследования динамики водного потока также использовался разработанный макет прибора „Визуализатор потока“ [11], позволяющий определять поля скорости течения в исследуемой области и визуализировать турбулентные процессы в придонном слое и в толще воды.

На рис. 2 показана схема участка работ с отмеченными створами и станциями в экспедиционных исследованиях, выполненных в 2021 г. на полигоне р.Черной.

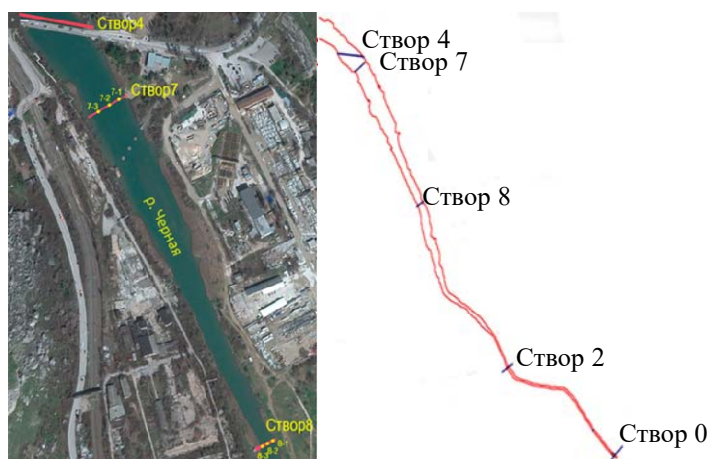


Рис. 2

Погодные условия в период проведения исследований были типичными для теплого периода года: было ясно, скорость ветра не превышала 4 м/с, при этом направление ветра менялось с юго-восточного на северо-западное, температура воздуха изменялась от 23,0 до 24,6 °С. Температура воды в устье реки изменялась в пределах 17,0 °С в створе 0 до 23,8 °С в створе 8, соленость — от 0,5 ‰ в створе 0 до 18,3 ‰ в створе 4. Расход воды в р. Черной, поступающей в Севастопольскую бухту, составлял 0,1 м³/с, что характерно для периода межени.

Пространственная изменчивость солености в зоне взаимодействия разнотипных вод представлена на рис. 3, *а* — створ 4, *б* — створ 7, *в* — створ 8; на графиках *H* — глубина, *S* — соленость, *N* — номер станции.

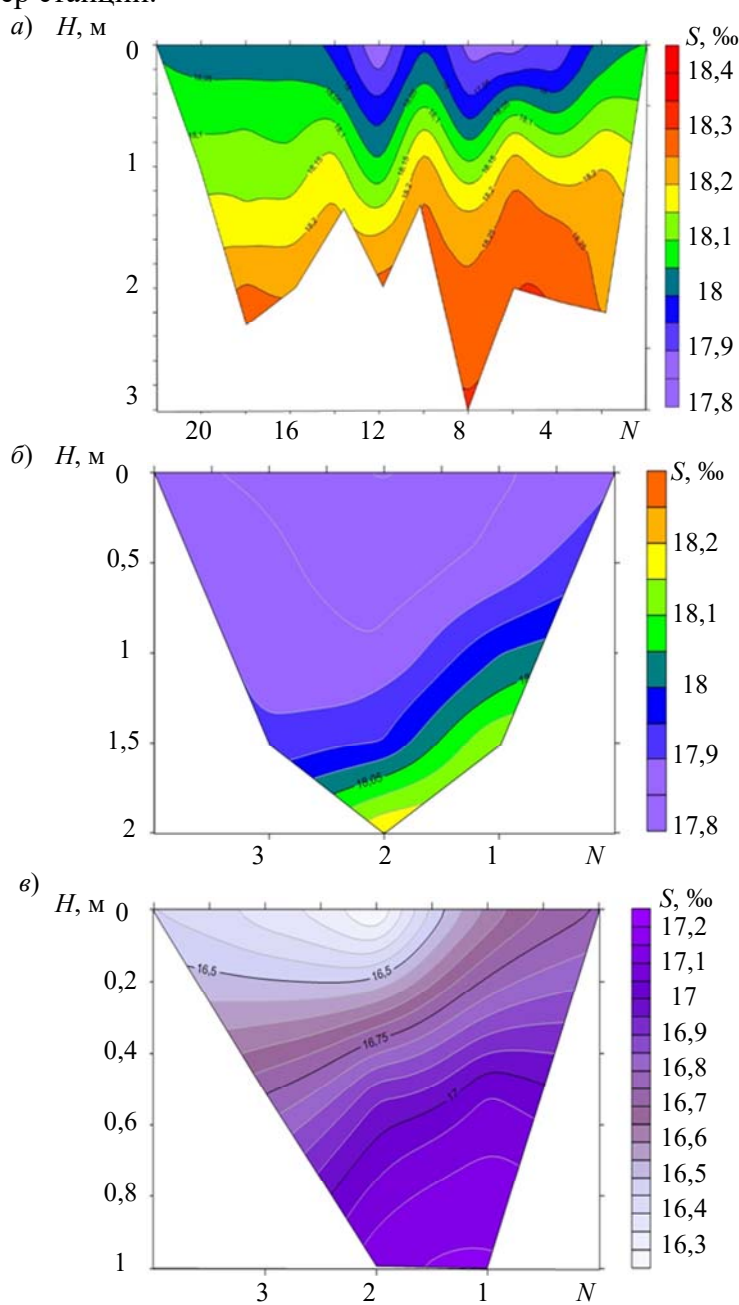


Рис. 3

Максимальный вертикальный градиент солености, рассчитанный между поверхностью и дном, в нижней части участка работ наблюдался на станции 8 створа 4 и составлял 0,2 ‰ на 1 м. Согласно данным по створам 7 и 8 характер расположения потоков соленой и пресной воды в целом не изменялся на данном участке устья, тогда как максимальная соленость к створу 8 уменьшалась до 17,2 ‰, при этом стратификация воды по солености была более вы-

ражена, максимальный вертикальный градиент на станции 2 створа 8 достигал 0,9 ‰ на 1 м. Соленость в створе 2 составила 10 ‰, в створе 0 — 0,5 ‰. Следовательно, средний горизонтальный градиент солености на участке исследований — 10,6 ‰ на 1 км.

Заключение. Разработана методика использования STD-зондов для исследований гидродинамических процессов в зонах смешения морских и речных вод в устьях малых рек и выполнена ее апробация в экспедиционных исследованиях на полигоне р. Черной. Использование данной методики в натурных условиях позволило получить данные о пространственной изменчивости солености в зоне взаимодействия разнотипных вод.

Таким образом, применение современных STD-зондов дает возможность получать информацию о распределении основных гидрологических параметров водной среды (удельной электропроводности (расчетной солености) и температуры) в натурных условиях, что необходимо при моделировании гидрологического режима устьев рек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлова М. В. Процессы проникновения морских вод в устья рек // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 5. С. 439—455
2. Миньковская Р. Я. Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Черного моря). Севастополь: МГИ, 2020. 364 с.
3. Антохина Е. Н., Жук В. А. Применение ИМК ECOMAG для моделирования стока воды с различных по площади водосборов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011, № 4. С. 17—32.
4. Алабян А. М., Беликов В. В., Крышенко И. Н., Лебедева С. В. Применение двумерных гидродинамических моделей для решения проблем регулирования русла Нижней Волги в условиях дефицита данных гидрологических изысканий // Инженерные изыскания. 2014, № 2. С. 18—28.
5. Portela L. I., Ramos S., Trigo-Teixeira A. Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin // J. of Coastal Research. 2013. N 65. P. 1188—1193.
6. Архипкин В. С., Лазарюк А. Ю., Левашов Д. Е., Рамазин А. Н. Океанология: инструментальные методы измерения основных параметров морской воды. М.: МАКС Пресс, 2009. 336 с.
7. Рамазин А. Н. Некоторые научно-методические аспекты метрологического обеспечения измерений электропроводности и температуры морской воды с помощью STD-зондов // Тр. ВНИРО. Техника для рыбохозяйственных исследований. 2016. № 159. С. 167—182.
8. Полонский А. Б., Шокурова И. Г., Белокопытов В. Н. Десятилетняя изменчивость температуры и солености в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2013. № 6. С. 27—41.
9. Paradis R., Wood S. L. Inexpensive Expendable Conductivity Temperature and Depth (CTD) Sensor // Conference: Oceans'13; MTS/IEEE San Diego, California, USA. 2013.
10. Гидрозонд автономный портативный „ГАП-АК-12Р“ [Электронный ресурс]: <http://mhiras.ru/sensors/gidrozond_avtonomnyj_portativnyj_GAP-AK-12R.html>, 19.04.2022.
11. Антоненков Д. А. Измерительный комплекс для исследования динамических характеристик и структуры течения водного потока в прибрежной морской зоне // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 12. С. 1112—1118. DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118.

Сведения об авторе

Дмитрий Александрович Антоненков — канд. техн. наук; Морской гидрофизический институт РАН, отдел гидрофизики шельфа; ст. научный сотрудник;
E-mail: dmitry_science@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.22; одобрена после рецензирования 11.05.22; принята к публикации 31.05.22.

REFERENCES

1. Mikhaylova M.V. *Vodnyye resursy*, 2013, no. 5(40), pp. 439—455 (in Russ.)
2. Minkovskaya R.Ya. *Kompleksnyye issledovaniya raznotipnykh morskikh ust'yev rek (na primere morskikh ust'yev rek*

- severo-zapadnoy chasti Chornogo morya*) (Comprehensive Studies of Different Types of Sea Mouths of Rivers (On the Example of Sea Mouths of Rivers in the Northwestern Part of the Black Sea)), Sevastopol, 2020, 364 p. (in Russ.)
3. Antokhina E.N., Zhuk V.A. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*, 2011, no. 4, pp. 17–32. (in Russ.)
 4. Alabyan A.M., Belikov V.V., Krshenko I.N., Lebedeva S.V. *Engineering survey*, 2014, no. 2, pp. 18–28. (in Russ.)
 5. Portela L.I., Ramos S. and Trigo-Teixeira A. *Journal of Coastal Research*, 2013, no. 65, pp. 1188–1193, ISSN 0749-0208.
 6. Arkhipkin V.S., Lazaryuk A.Yu., Levashov D.E., Ramazin A.N. *Okeanologiya: instrumental'nyye metody izmereniya osnovnykh parametrov morskoy vody* (Oceanology: Instrumental Methods for Measuring the Main Parameters of Sea Water), 2009, Moscow, 336 p. (in Russ.)
 7. Ramazin A.N. *Trudy VNIRO. Tekhnika dlya rybokhozyaystvennykh issledovaniy*, 2016, no. 159, pp. 167–182. (in Russ.)
 8. Polonskiy A.B., Shokurova I.G., Belokopytov V.N. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2013, no. 6, pp. 27–41. (in Russ.)
 9. Paradis R., Wood S.L. *Inexpensive Expendable Conductivity Temperature and Depth (CTD) Sensor*, Conference: Oceans'13 At: MTS/IEEE San Diego, California, USA. 2013.
 10. http://mhi-ras.ru/sensors/gidrozond_avtonomnyj_portativnyj_GAP-AK-12R.html. (in Russ.)
 11. Antonenkov D.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 12(63), pp. 1112–1118, DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118. (in Russ.)

Data on author**Dmitry A. Antonenkov**

— PhD; Marine Hydrophysical Institute of the RAS, Shelf Hydrophysics Department; Senior Researcher; E-mail: dmitry_science@mail.ru

Received 20.04.22; approved after reviewing 11.05.22; accepted for publication 31.05.22.