

УДК 504.064.3

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА УСТЬЕВ МАЛЫХ РЕК

© 2024 г. Д. А. Антоненков*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: dmitry_science@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.03.2022 г.

После доработки 19.04.2023 г.

Принята в печать 16.08.2023 г.

В настоящее время устья рек интенсивно осваиваются, в связи с чем требуется получение актуальной информации об их современном экологическом состоянии, гидрологическом режиме и географических особенностях. В соответствии с этим важным является разработка и усовершенствование методов и технических средств экологического мониторинга устьев рек. В статье приведена разработанная методика комплексных исследований устьев малых рек, основанная на применении новых технических средств и методов. Показан опыт применения современных приборов отечественной разработки для решения практических задач комплексного водно-экологического мониторинга на примере выполнения экспедиционных работ в устье р. Черная, Севастопольской бухте (п-ов Крым, г. Севастополь). Описаны возможности используемых технических средств: STD-зонда ГАП-АК-12Р (МГИ РАН), биофизического комплекса «Кондор» (НПП «Аквастандарт»), эхолота Garmin, позволяющих получать натурные данные о мутности, концентрации взвеси, скорости и направлении течения, среднем размере взвешенных частиц, солености и температуре водной среды. Представлены результаты применения нового метода определения скорости течения и расхода воды, основанного на обработке видеоизображений. Применение разработанной методики дает возможность получить информацию, необходимую для анализа гидрологического режима и экологического состояния устьев малых рек.

Ключевые слова: методы, приборы, устья рек, экологический мониторинг

DOI: 10.31857/S0030157424010116, **EDN:** SNLPJC

ВВЕДЕНИЕ

Задачам исследования гидрологических процессов в устьях рек посвящено достаточно много работ как зарубежных, так и отечественных авторов. В настоящее время исследования устьев рек включают в себя постоянный экологический мониторинг с использованием стационарных постов (устьевых станций) [12, 11, 8], а также математическое моделирование [1, 5]. При этом использование моделей позволяет получить достаточно широкий набор характеристик водного объекта в различных пространственно-временных масштабах. В то же время основной проблемой в данной области является верификация модельных расчетов, а именно сопоставление полученных результатов с натурными данными, что выполняется редко. В соответствии с этим наиболее эффективным методом изучения устьевых процессов является сочетание моделирования, методов дистанционного зондирования и верификации результатов путем сопоставления с натурными

данными, полученными на стационарных постах и в экспедиционных исследованиях.

В настоящее время сеть устьевых станций ограничена, а на малых реках они в основном отсутствуют. При этом малые реки, в частности в Крыму, имеют важное значение как в экологическом, так и в инфраструктурном плане, и их изучение является актуальной и востребованной задачей. Наиболее эффективным способом экологического мониторинга данных географических объектов является организация комплексных экспедиционных исследований, цель которых заключается в получении натурных данных для оценки современного экологического состояния водного объекта, баланса вещества и энергии, процессов смешения речной и морской воды, транспорта наносов и дальности проникновения соленой воды на устьевой участок реки. В свою очередь эта информация позволит дать физико-географическую характеристику, выполнить анализ изменчивости гидрологических параметров под влиянием природных и антропогенных факторов,

спрогнозировать возможные изменения в процессах распределения соленой и пресной воды, осадконакопления в устьевой области, а также сформулировать рекомендации по предотвращению возможных негативных последствий хозяйственной деятельности в прилегающих к устью реки районах.

Основная цель работы состоит в том, чтобы разработать методику комплексных экспедиционных исследований процессов и явлений в устьях малых рек и продемонстрировать результаты, полученные с использованием современных приборов отечественной разработки для решения практических задач экологического мониторинга в устье р. Черной (г. Севастополь).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В 2017–2022 гг. в МГИ РАН проводились экспедиционные исследования в устьевой области р. Черной (г. Севастополь). Морское устье р. Черной включает устьевой участок реки и сложное устьевое взморье — Инкерманский лиман, Севастопольскую бухту и прилегающую часть Черного моря (рис. 1) [9].

Устьевой участок р. Черной и прилегающее взморье активно используются в практических целях. Здесь осуществляется судоходство, имеются стоянки судов, производится сброс сточных вод, планируется и осуществляется реконструкция и строительство причальных сооружений и объектов портовой инфраструктуры. На р. Черной расположено Чернореченское водохранилище, являющееся основным источником пресной воды г. Севастополя.

В то же время, несмотря на хозяйственную деятельность, процессы, протекающие в устье, остаются малоизученными. Основной задачей научных исследований являлось получение натуральных данных о солености, температуре и мутности воды, концентрации взвешенных наносов, а также составляющих баланса воды, тепла и веществ (скорость и направление течений, расход воды). Их определение дает возможность проанализировать особенности проникновения соленой воды в Инкерманский лиман и на устьевой участок реки, изучить процессы смешения в устье реки, поступление наносов с речным стоком, а также осадконакопление в рассматриваемой акватории.

На основании полученного в ходе выполнения работ опыта была разработана методика проведения экспедиционных работ в устьях малых рек с использованием современных методов и средств измерений.

По результатам рекогносцировочной экспедиции были получены предварительные данные об объекте исследования. В ходе анализа географических особенностей местности определены гидрометрические створы и необходимое количество станций. На рисунке 2 показана схема расположения створов в устье р. Черной.

При выборе створов учитывались особенности местности, наличие гидротехнических сооружений (мостов, плотин, переходов), подъездные пути. Для определения профиля дна в створах выполнялись батиметрические съемки с использованием лотлиния и эхолота Garmin Echomap 42dv. Выполненные промерные работы позволили получить представление о рельефе дна устья. Для примера на рисунке 3 представлен продольный профиль участка устья реки от створа 4 до створа 2.

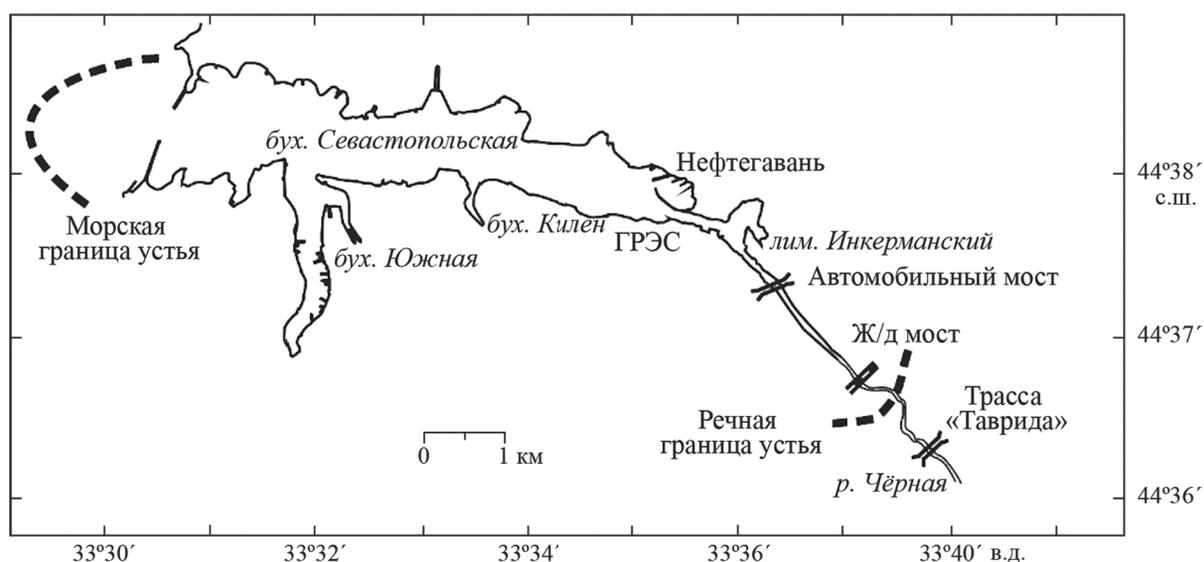


Рис. 1. Морское устье р. Черной.

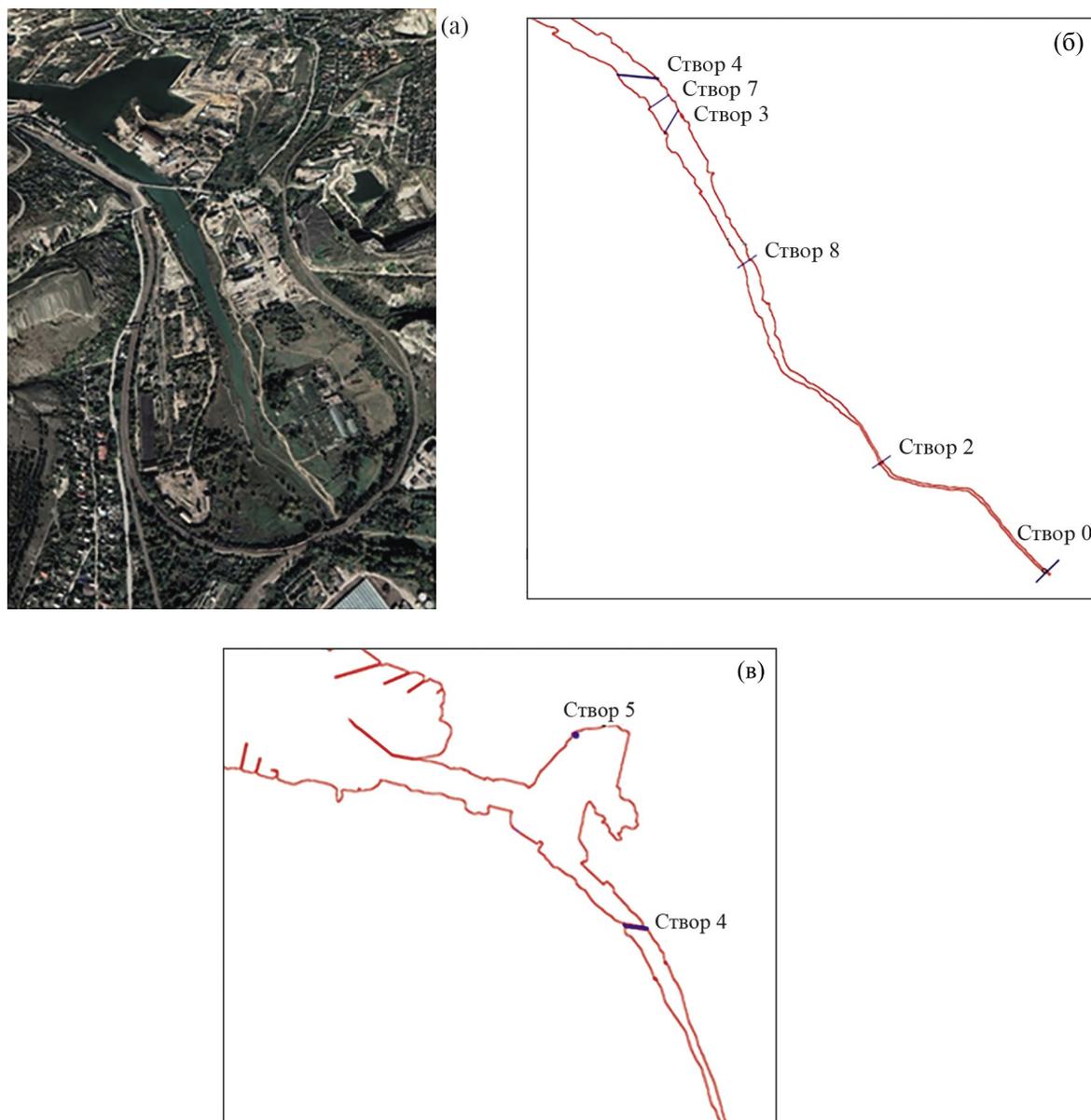


Рис. 2. Спутниковый снимок устья р. Черной (а), схемы створов в устье (б) и в Инкерманском лимане (в).

Благодаря данным работам была выявлена локальная область аккумуляции наносов в районе 3 створа (рис. 4). Образование данной области предположительно связано с располагавшимся там ранее железнодорожным мостом, а также приливными и сгонно-нагонными явлениями.

Сезонные экспедиции выполнялись ежеквартально, их целью являлось выявить сезонные особенности процессов и явлений в устьевой области. В ходе таких экспедиций проводились метеорологические наблюдения с использованием мобильной метеостанции и уровнемера для фиксации изменений уровня воды в реке, а так-

же получения информации о погодных условиях: температуре и влажности воздуха, атмосферном давлении, скорости и направлении ветра. С помощью современных технических средств определялись характеристики водной среды по каждому створу: концентрация общей взвеси (мутность), соленость и температура воды, скорость течения, наличие турбулентных и застойных зон.

Так, для получения данных о солености и температуре применялись современные STD-зонды [3]. В частности, использовался разработанный в МГИ РАН гидрозонд «ГАП-АК-12Р» [4, 16], основные характеристики и фотоизображение которого представлены на рис. 5.

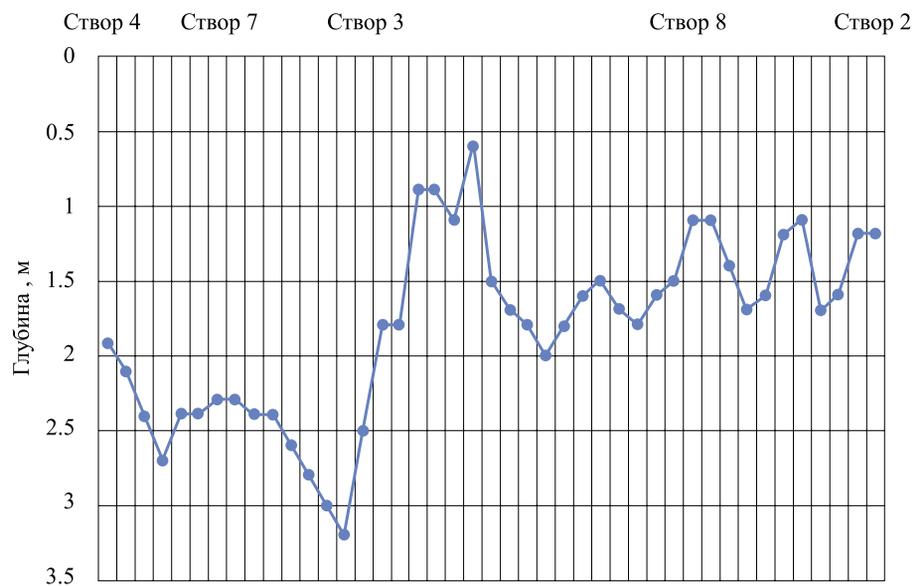


Рис. 3. Продольный профиль отдельного участка устья р. Черной.

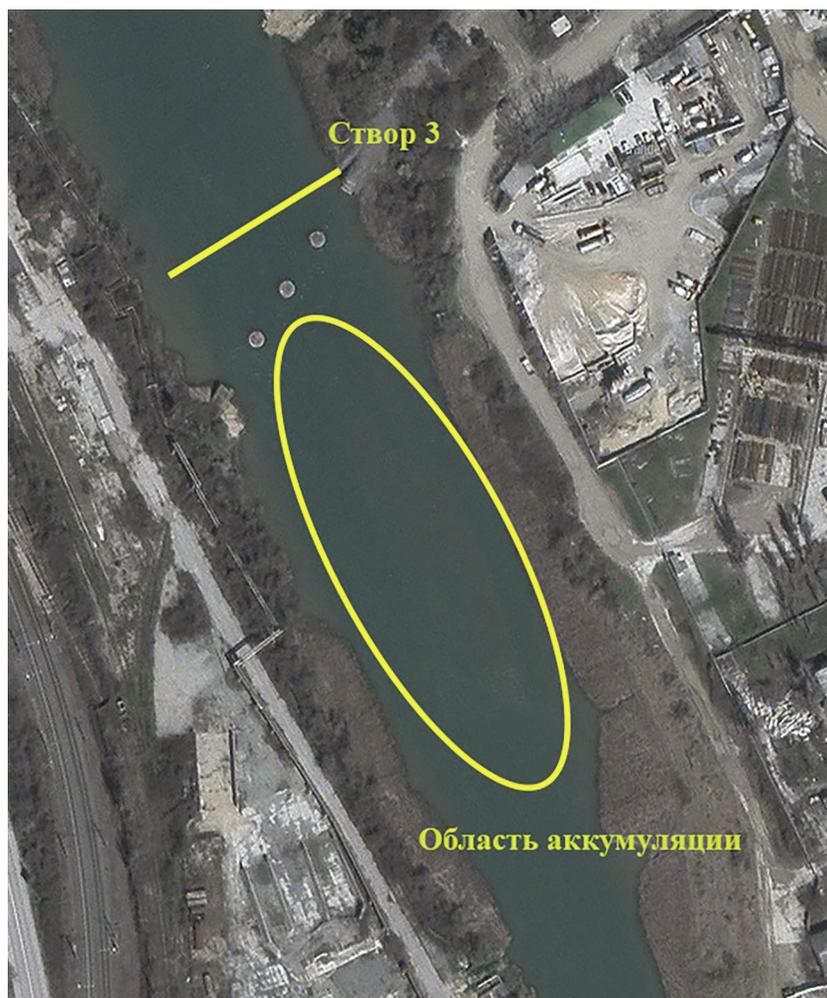
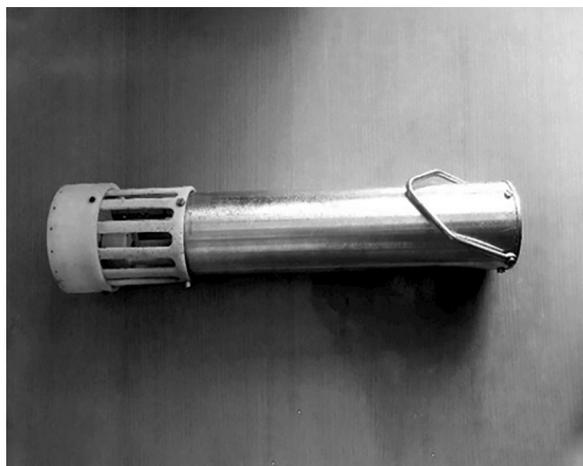


Рис. 4. Спутниковый снимок участка устья р. Черной с отмеченной областью аккумуляции наносов.



Параметр	Допустимое значение
Диапазон измерений температуры, °С;	от -2 до + 38
Пределы погрешности канал температуры, °С	±0.03
Диапазон измерений электрической проводимости, отн. ед;	1-й д-н от 0 до 0.9; 2-й д-н от 0.6 до 1.5.
Пределы погрешности электрической проводимости, отн. ед	± 7.5×10-4
Диапазон измерений гидростатического давления, МПа;	от 0 до 2.5
Пределы погрешности гидростатического давления, МПа	± 6.25×10-3

Рис. 5. Фотоизображение и характеристики гидрозонда «ГАП-AK-12P».

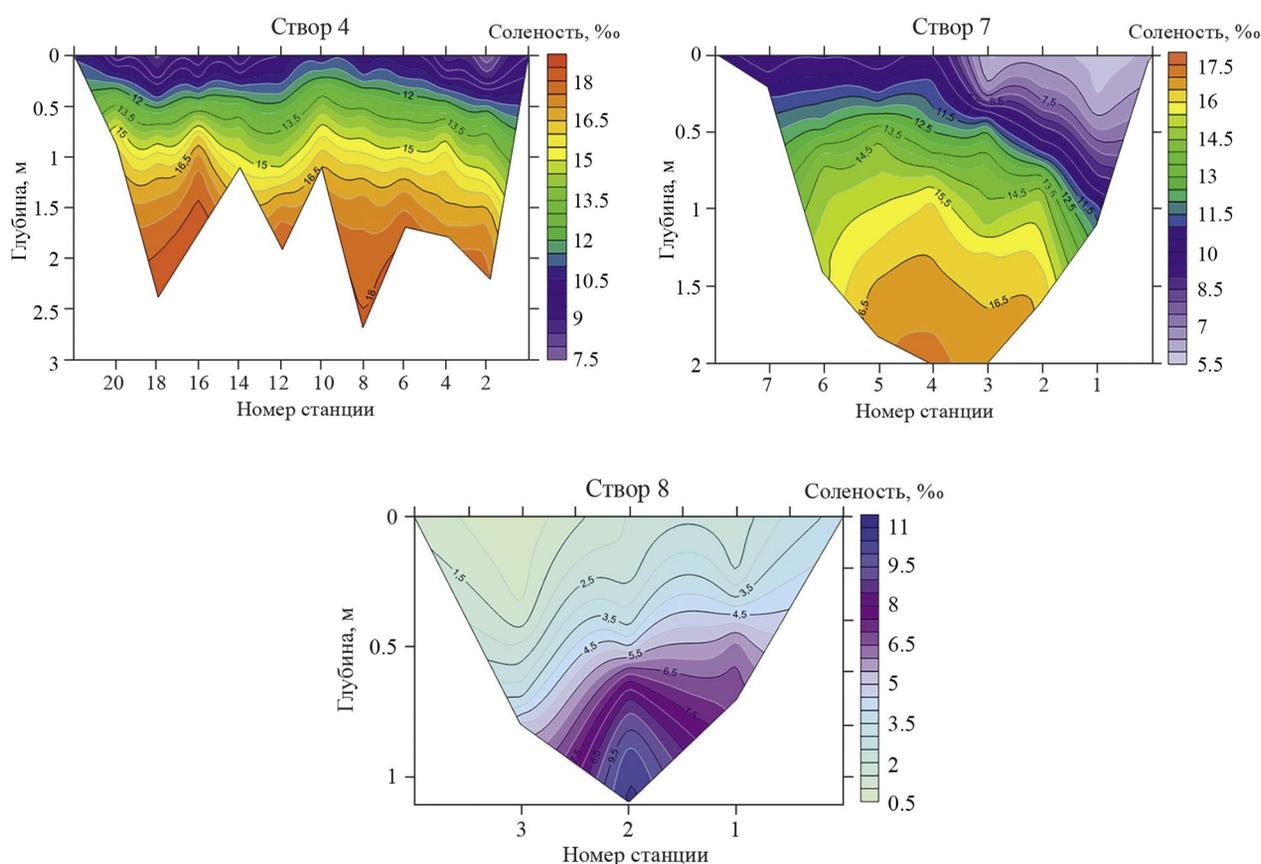


Рис. 6. Пространственная изменчивость солености в устье р. Черной, 2022 г.

Прибор использовался в автономном режиме. Работы выполняли методом зондирования. Для каждой станции были определены измерительные горизонты с шагом 0.25 м, но не менее трех (придонный слой, середина глубины станции, поверхностный слой). Прибор полностью по-

гружали в воду в поверхностном слое и далее постепенно опускали до соприкосновения со дном с выдержкой прибора на каждом измерительном горизонте в течение 30–60 с. Применение такой методики измерений позволило получить репрезентативные данные с учетом особенностей обла-

сти выполнения измерений, характеризующейся высокой динамической активностью водных масс.

По результатам обработки полученных с STD-зонда данных сделаны оценки распределения солёности в створах по направлению к вершине устья р. Черной (рис. 6). На профилях хорошо визуализируется расслоение водного потока. Наибольший вертикальный градиент солёности, рассчитанный между поверхностью и дном, в нижней части участка работ наблюдался на ст. 8 створа 4 и составлял 3.14 ‰/м. По данным измерений в створах 7, 8 видно, что характер расположения потоков солёной и пресной воды в целом не изменялся, в то время как солёность воды по направлению к реке закономерно уменьшалась, а расслоение возрастало. Так, максимальный вертикальный градиент на ст. 2 створа 8 достигал 7.72 ‰/м.

Применение STD-зондов в области смешения морских и речных вод в устьях рек позволяет исследовать структуру разнородных потоков, определять границы области смешения морских и речных вод и дальность проникновения морской воды в устье.

Для исследования процессов седиментации и транспорта наносов проводились измерения концентрации взвеси, мутности, скорости и направления течения. Для этих целей применялся зондирующий биофизический комплекс «Кондор» (НПП «Аквастандарт») [6]. Его изображение и технические характеристики показаны на рис. 7.

Данный комплекс предназначен для оперативного проведения исследований пространственного распределения и вертикальной стратификации основных параметров, характеризующих биофизические свойства водной экосистемы. В его составе использовались следующие модули: турбидиметр-мутномер с каналом гидростатического давления, измеритель скорости течения, измеритель солёности (электропроводности), измеритель температуры [6].

Измерения выполняли на каждой станции методом зондирования до дна со скоростью порядка 0.2 м/с. Для измерения скорости и направления течения при достижении дна комплекс приподнимался на 0.1–0.2 м и выполнялась его выдержка на горизонте в течение 30–60 с для получения усреднённых данных. Затем комплекс припод-



Параметр	Значение	Погрешность
Гидростатическое давление, Мпа	0–10	±0.01
Температура, °С	-2–35	±0.05
Мутность, ЕМФ	0.2–10	±0.1
Концентрация общего взвешенного вещества (расчетная – [1]), мг/л	0.12–8	±0.2
Электропроводность, 1-й диапазон, отн. ед. (мСм/см)	0–0.9(42)	±0.001
2-й диапазон, отн. ед. (мСм/см)	0.62(26.6)–1.6(69)	±0.0015
Солёность (расчетная), ЕПС	0.1–25	±0.01
Скорость течения, м/с	0.02–3.00	±0.05
Направления течения, град	0–360	±3
Вес (на воздухе), кг	<3.5	-
Габариты, см:	12×12×350	-
Глубина погружения, м	100	-
Частота измерений, Гц	4	-

Рис. 7. Изображение биофизического комплекса «Кондор» и его технические характеристики.

нимался на 0.5 м и вновь проводилось измерение скорости и направления течения — и так до поверхностного 0.5-метрового слоя воды. Пересчет измеряемых единиц мутности (ЕМФ) в весовые единицы (мг/л) для расчета концентрации общей взвеси проводился в соответствии с методикой, описанной в работе [15]. Пример построенных распределений мутности и скорости течения представлен на рис. 8.

В ходе работ с помощью комплекса были получены данные о мутности, концентрации взвеси, скорости и направлении течения, данные о среднем размере взвешенных частиц. Определены зоны седиментации в устье реки, а также объем поступления взвешенных наносов в приемный водоем.

Благодаря применению новых методов мониторинга гидрологических параметров, основанных на использовании фото- и видео-регистрации, выполнен анализ динамических характеристик и структуры течения водного потока. Для этих целей использовался разработанный экспериментальный образец прибора «Визуализатор потока», позволяющий получать мгновенные и осредненные поля распределения скорости течения в широком пространственном и временном диапазонах.

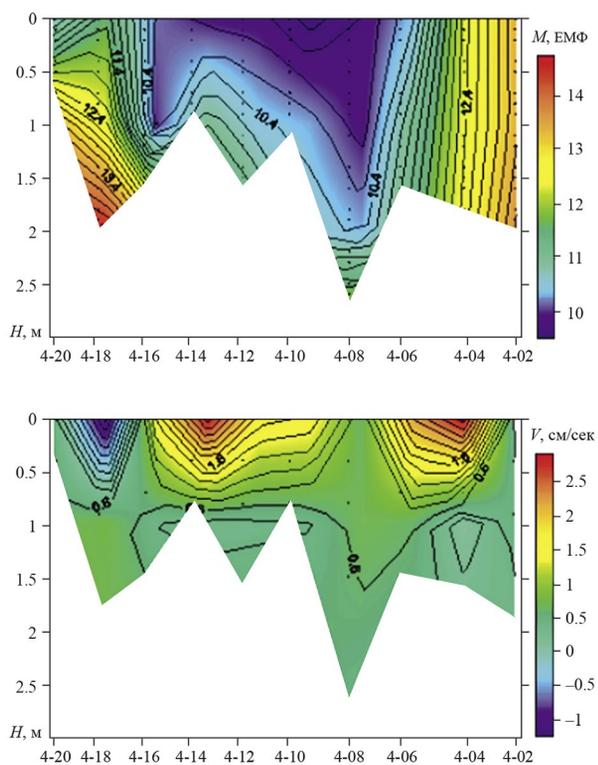


Рис. 8. Пространственная изменчивость мутности и скорости течения в створе 4 в устье р. Черной, 2020 г.

Работа прибора основана на использовании метода анемометрии по изображениям частиц (PIV-метод) [17]. Суть метода заключается в следующем: в поток вносятся специальные частицы-трассеры, которые освещаются в течение определенного промежутка времени системой подсветки. Одновременно с этим происходит регистрация видеоизображения на цифровую камеру. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц и построить двумерное векторное поле скорости. Для определения скорости частиц используется кросс-корреляция двух последовательных изображений.

Разработанный экспериментальный образец прибора состоит из устройства подсветки, цифровой видеокамеры, элементов крепления/позиционирования и программного обеспечения для обработки данных. Его изображение представлено на рис. 9.

Методика выполнения натуральных экспериментов заключалась в следующем: после предварительной настройки системы и выполнения калибровки измеритель опускался в воду на заданный горизонт с использованием телескопической штанги, далее с помощью специальной пластины, выполняющей роль флюгера, установка разворачивалась по направлению течения потока

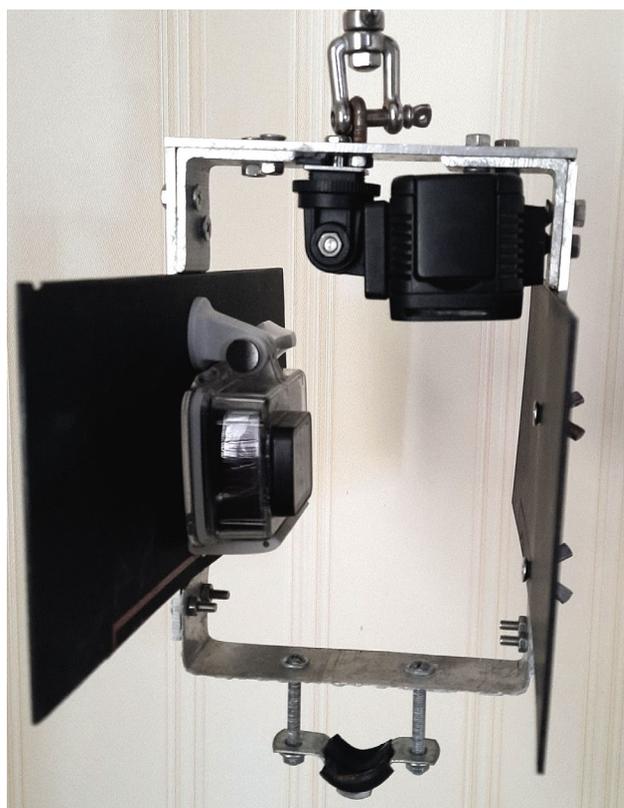


Рис. 9. Изображение экспериментального прибора «Визуализатор потока».

и производилась видеосъемка в его продольном сечении. В качестве трассеров использовались уже имеющиеся в толще воды природные частицы взвеси [2]. На рис. 10 показан пример обработки полученных видеоданных с построенным полем скорости течения для поверхностного слоя воды [14].

Применение данного прибора в экспедиционных исследованиях позволило получить более детальное представление о тонкой структуре течения, выявить турбулентные и застойные зоны. На рис. 11 показано распределение средней скорости водного потока в створе 4 в устье р. Черной, построенное с использованием полученных прибором данных.

Для верификации полученных данных параллельно выполнялись аналогичные эксперименты по определению скорости течения с использованием биофизического комплекса «Кондор» [6]. Результаты исследований обоими методами хорошо совпадают, расхождения не превышают 9%. Это подтверждает достоверность и достаточно высокую точность получаемых данных с использованием методов видеорегистрации.

Применение данного прибора позволяет определять скорость течения и получать данные о динамике водного потока в диапазоне скоростей до 2 м/с. Кроме того, данный измеритель можно использовать при исследовании сложных донных турбулентных течений, процессов переноса донных на-

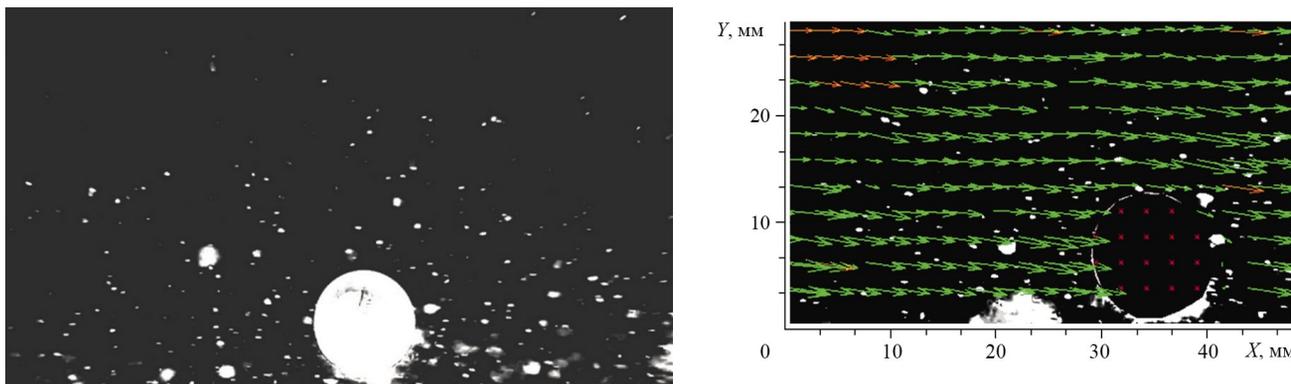


Рис. 10. Пример полученного изображения (слева) и построенное мгновенное поле скорости течения в поверхностном слое воды (справа).

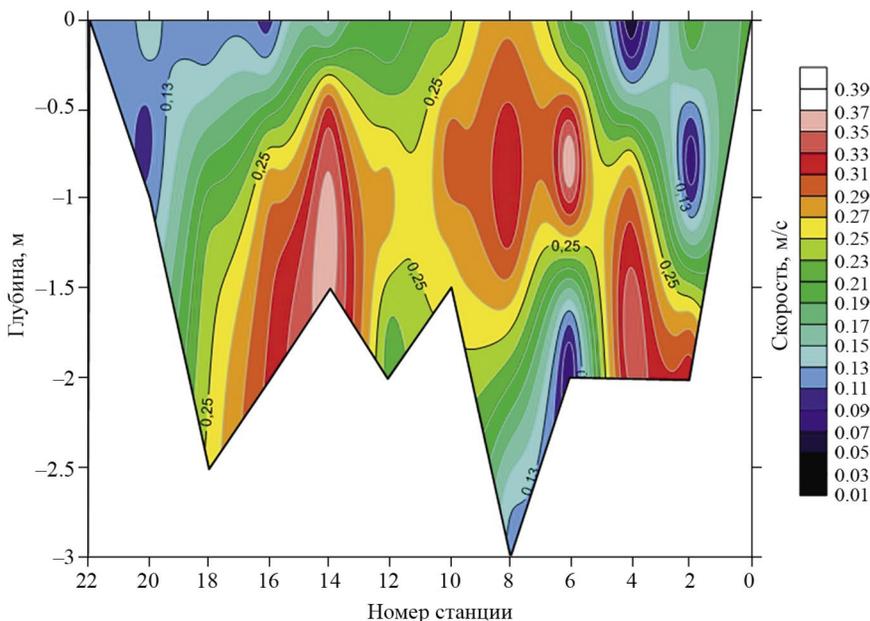


Рис. 11. Распределение средней скорости течения водного потока в створе 4 в устье р. Черной.

носов, что в свою очередь дает возможность получить более детальное представление о характере природных процессов и их особенностях.

Для определения стока воды в устьевой области применялся новый разработанный метод, основанный на обработке полученных видеоизображений водного потока реки и данных батиметрических измерений в створе. Данный метод основан на определении поверхностной скорости течения и может использоваться для оценки расхода воды в устьях малых рек на мелководных и нестратифицированных участках. Промерные работы выполнялись с помощью лотлиня, а для малых глубин — гидрометрической штангой.

Методика определения расхода воды с помощью нового метода заключается в последовательном выполнении ряда этапов:

Определение реперных расстояний на местности, вычисление коэффициентов для пересчета расстояний и размеров на полученных изображениях в реальные единицы измерения.

Регистрация видеоизображений, на которых должны быть видны оба берега с реперными отметками и створ, в котором выполнены батиметрические измерения. Для точного определения скорости течения на поверхности воды должна присутствовать рябь, волнение (поверхность визуально не должна быть гладкой). При ее отсутствии рекомендуется использовать трассеры. В проводимых экспериментах в качестве трассеров применялся природный материал (листья, трава, части веток и др.), который равномерно распределялся по всей ширине реки перед обла-

стью регистрируемого участка (ширина створов для определения расхода не превышала 12 м).

Построение поля поверхностной скорости потока с использованием PIV метода [13] и программного обеспечения Matlab, определение створа на изображении и расчет средних значений поверхностной скорости течения для каждого участка.

Расчет расхода воды по методу «площадь-скорость», используя следующие соотношения [7]:

$$Q = \sum q_i$$

$$q_i = k * s_i * v_i$$

где Q — общий расход воды, м³/с; q_i — расход воды i -го участка, м³/с; v_i — средняя поверхностная скорость течения для i -го участка, м/с; s_i — площадь i -го участка, м², k — переходный коэффициент, учитывающий изменение скорости течения по глубине потока.

Значения переходного коэффициента k было выбрано равным 0.8 в соответствии с методикой [7] для глубин водного потока до 1 м песчано-галечного русла с ровными берегами без растительности. Для верификации нового метода применялся стандартный метод с использованием поплавков нейтральной плавучести [10]. Расхождения в результатах определения расхода воды с помощью обоих методов не превышали 10%.

На рис. 12 и 13 показаны примеры программной обработки видеоизображений участка устьевой области с помощью PIV метода и полученные данные о расходе воды в одном из створов реки.

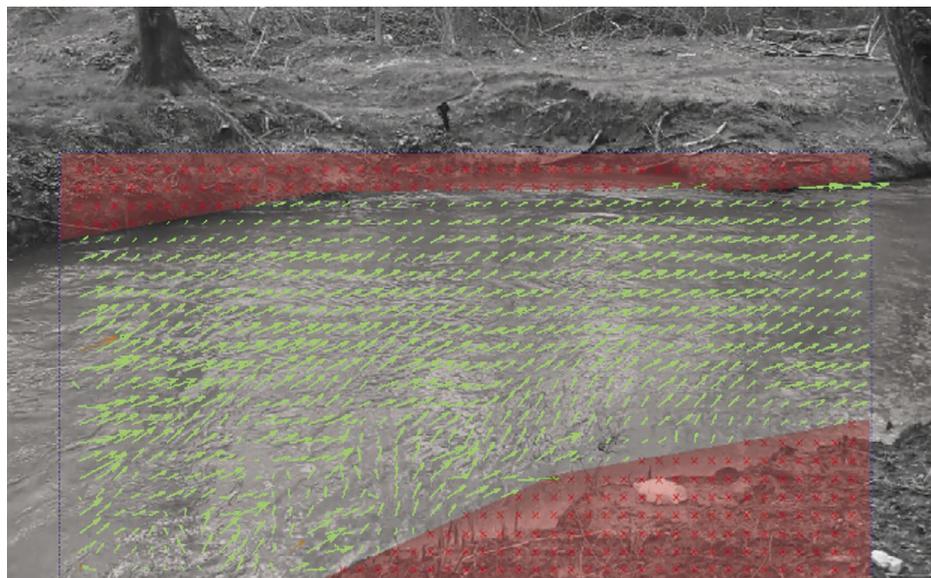


Рис. 12. Пример обработки видеоизображений водного потока реки для определения поверхностной скорости водного потока.

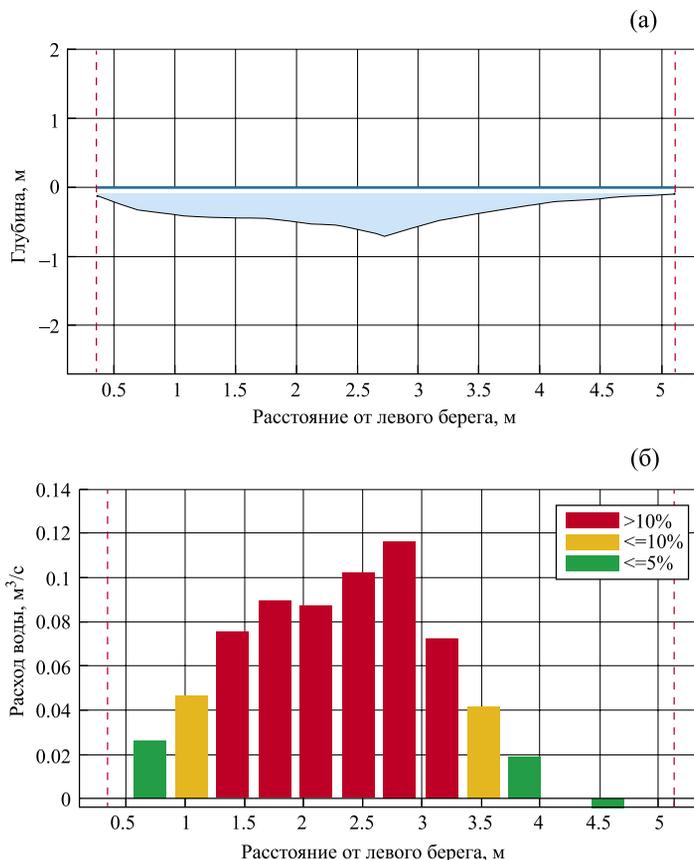


Рис. 13. Результаты батиметрических измерений и диаграмма расхода воды в створе 1 р. Черной.

Основным преимуществом использования методов, основанных на видеорегистрации, является возможность получения оперативных данных об исследуемых гидрологических характеристиках без наличия дорогостоящего оборудования и необходимости организации комплексных экспедиций. Так, можно получить данные о стоке воды в исследуемом устье реки в любое время, прибыв на заранее размеченный створ и используя только камеру, позволяющую снимать видеозапись изображения необходимого качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение новых методов и средств измерения отечественной разработки позволяет оперативно получить натурные данные, необходимые для изучения процессов динамического взаимодействия речных и морских вод в устьях малых рек. Используемые при проведении измерений приборы обладают многими достоинствами, позволяющими проводить совместные измерения вертикальных распределений скорости течения и концентрации взвешенного вещества, а также параметров стратификации — температуры и солености воды.

Результаты экспедиционных работ, описанные в работе, демонстрируют потенциальные возможности используемого оборудования, что в дальнейшем позволит применить описанные приборы, методы, организационно-технические приемы для решения практических задач комплексного водно-экологического мониторинга различных водных объектов.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме №FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. 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. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118>
3. Архипкин В.С., Лазарюк А.Ю., Левашов Д.Е., Рамзин А.Н. Океанология // Инструментальные методы измерения основных параметров морской воды: Учебное пособие. М.: Изд-во МАКС Пресс, 2009. 335 с.
4. Гидрозонд автономный портативный «ГАП-АК-12Р». URL: http://mhi-ras.ru/sensors/gidrozon_d_avtonomnyj_portativnyj_GAP-AK-12R.html. (дата обращения 28.09.2022).
5. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и русловые процессы. СПб: Нестор—История, 2011. 504 с.
6. Комплекс гидробиофизический мультипараметрический погружной автономный «КОНДОР». URL: <http://ecodevice.com.ru/ecodevice-catalogue/multiturbidimeter-kondor> (дата обращения: 30.04.2023г.).
7. Лучшева А.А. Практическая гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 424 с.
8. Методические указания. Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек: Руководящий документ РД 52.10.324-92. Введ. с 01.01.1993 г. по 2002 год. М., 1993. 188 с.
9. Миньковская Р.Я. Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Черного моря): электронный ресурс / Р.Я. Миньковская; ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН». Севастополь, 2020. 364 с. ISBN 978-5-6043409-2-9. <https://doi.org/10.22449/978-5-6043409-2-9>
10. Михалев В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. Изд. 3-е, стер. М.: Высш. шк., 2008. 463 с.
11. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Часть 1. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах: Руководящий документ РД 52.10.842-2017. Введ. с 27.11.2017 г. № 595 по 2022 год. М., 2017. 375 с.
12. Руководство по гидрометеорологическому исследованию устьевых областей рек, впадающих в море: Руководящий документ РД 52.10.879-2019 утвержден 23.07.2019 / ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова»; Введ. с 08.11.2019 г. № 579 по 2025 год. М., 2020. 86 с.
13. Хмелевой С.В. Использование GPU для расчетов скоростей газо-жидкостных сред с помощью метода PIV // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2012. № 6 (58). С. 124–129.
14. Antonenkov D.A. Water flow speed determining using visualization methods // Scientific Visualization. 2020. V. 12. № 5. P. 102–111. <https://doi.org/10.26583/sv.12.5.09>
15. Chepyzhenko A.A., Chepyzhenko A.I. Methods and device for in situ total suspended matter (TSM) monitoring in natural waters' environment // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104663G (30 November 2017). <https://doi.org/10.1117/12.2287127>
16. Dykman V.Z. Technical tools for studying structure and dynamics of water masses // Physical Oceanography. 2016. № 6 (192). P. 43–55.
17. Jahanmiri M. Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications. Research report 2011:03. Department of applied mechanics, Chalmers University of technology, Göteborg, Sweden. 2011. 58 p.

MODERN METHODS AND TECHNICAL INSTRUMENTS OF ECOLOGICAL MONITORING OF THE ESTUARIES OF SMALL RIVERS

D. A. Antonenkov*

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: dmitry_science@mail.ru*

At present, river estuaries are constantly being explored; therefore, it is necessary to receive up-to-date information on their actual environmental condition, hydrological regime, and geographical features. Therefore, it is important to develop and improve the methods and technical instruments for monitoring river estuaries. The article presents a developed methodology for integrated research of small-river estuaries using new methods and techniques. The article discusses the experience in using modern domestic devices for solving practical problems of integrated water–environmental monitoring with a case study of expeditionary work in estuaries of the Chernaya River (Crimean Peninsula, Sevastopol). The possibilities of the following technical instruments used are described: The GAP-AK-12R CTD (MHI RAS), the Condor biophysical complex (AquaStandard), and the Garmin echo sounder, which make it possible to obtain field data on

turbidity, the concentration of suspended particulate matter, speed and direction of currents, the average size of suspended particles, and salinity and temperature of the aquatic environment. The results of applying a new method for determining the flow velocity and water consumption based on video image processing are presented. Application of the developed methodology makes it possible to obtain the information necessary to analyze the hydrological regime and ecological state of small-river estuaries

Keywords: methods, devices, river estuaries, environmental monitoring