

Определение адвективных составляющих обмена массой, теплом и веществами по натурным данным в устье реки Черной (Севастопольский регион)*

Р. Я. Миньковская, К. А. Слепчук, Д. А. Антоненков

Морской гидрофизический институт РАН,
Российская Федерация, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2

Для цитирования: Миньковская, Р. Я., Слепчук, К. А., Антоненков, Д. А. (2023). Определение адвективных составляющих обмена массой, теплом и веществами по натурным данным в устье реки Черной (Севастопольский регион). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 68 (1), 122–135. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.107>

Физико-математическое моделирование нестационарных обменных процессов в зоне взаимодействия разнородных вод в устьях рек пока остается проблематичным. Поэтому в работе предложена и апробирована методика оценки разнонаправленных расходов воды, тепла и солей в этой зоне по натурным данным. Для этого была разработана программа, рассчитанная на многолетние экспедиционные исследования, выполнены натурные измерения в 2017–2021 гг., разработаны алгоритм и программа расчета, выполнено апробирование методики количественной оценки составляющих обменных процессов по данным натурных исследований в 2019 г. в устье р. Черной, в зоне взаимодействия речной и распресненной воды Севастопольской бухты. В статье представлена методика и приводится пример оценки водо-, соле- и теплообмена для репрезентативной экспедиции, выполненной при средних гидрометеорологических условиях в период межени. Расчеты сделаны аналитическим методом, с помощью стандартных программ, и графическим методом, путем графической интерполяции и планиметрирования площадей. Расхождения между результатами, полученными разными методами, составляли 2–7%, что свидетельствует о возможности применения данной методики для обработки многолетнего массива данных с достаточной точностью. Предлагаемый метод количественной оценки составляющих обменных процессов по натурным данным может быть использован в любом створе разнотипных устьев рек для балансовых расчетов, прогнозирования возможных изменений их состояния и прилегающих частей моря под влиянием природных и антропогенных факторов, а также для калибровки и верификации моделей.

Ключевые слова: водообмен, солеобмен, теплообмен, алгоритм расчета, методика количественной оценки, составляющие обменных процессов, устье р. Черной, зона взаимодействия.

1. Введение

Процесс взаимодействия разнородных вод в устьях рек носит динамичный адвективно-диффузионный характер. Его физико-математическое моделирование, особенно в устьях малых рек, затруднительно. Несмотря на то что имеются примеры

* Исследование выполнено в рамках темы FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2023

использования моделей одномерной, двумерной и трехмерной схематизации (Панченко и др., 2020) для устьев крупных рек, применять их к устьям малых рек Крыма пока не удавалось. Это обусловлено значительной изменчивостью во времени и пространстве параметров среды и недостаточной изученностью водного режима устьев малых рек, что затрудняет калибровку моделей. В вершинах устьев обычно отсутствуют водомерные посты, а устьевые взморья исследуются эпизодически. В литературных источниках информация о количественной оценке составляющих обменных процессов в непреливных или микроприливных устьях малых рек не обнаружена. Основное внимание уделялось устьям крупных рек и приливно-отливным явлениям в устьях малых рек. Так, в работе (Мискевич, 2019) показано, что гидрологические и гидрохимические процессы в устьях малых рек имеют специфические особенности обмена между рекой и морем. При этом из-за сложности и динамичности устьевых процессов и трудностей организации детальных исследований в устьях рек количественная оценка адвективного обмена водой, теплом и веществами в зоне взаимодействия разнородных вод не выполнялась. Предшествующие работы по таким оценкам касались обменных процессов в Кинбурнском проливе Днепровско-Бугского лимана и в проливе Тонком, соединяющем лагуну Сиваш с Азовским морем (Minkovskaya and Demidov, 2014; Симов и др., 2016; Eremina and Evstigneev, 2020).

Натурные исследования по определению адвективных составляющих обменных процессов, материалы которых использованы в данной работе, проводились в пределах промышленной зоны г. Севастополя: в семи створах на устьевом участке р. Черной (протяженностью 0,6 км), вершина которого была ограничена искусственным сооружением, и в Инкерманском лимане. Устьевое взморье реки включает искусственно созданный Инкерманский лиман, Севастопольскую бухту и прилегающую часть Черного моря, в которую в период паводков из бухты поступают распресненные воды (Миньковская, 2020).

Река Черная относится к малым рекам, но после р. Бельбек она является второй по водоносности рекой Крыма и главным источником водообеспечения Севастопольского региона. Средний многолетний сток р. Черной на водпосту с. Хмельницкое, в 9,5 км от устья, за период с 1961 по 2021 г. составлял $1.83 \text{ м}^3/\text{с}$ (0.058 км^3). Паводочный режим стока реки обуславливает существенную краткосрочную изменчивость состояния устья и относительную стационарность режима в межень, то есть в большую часть года. Естественный режим стока реки был нарушен в результате сооружения Чернореченского водохранилища (в 1954 г.) и водонакопителей, а также существенного забора воды на орошение и водоснабжение. Регулирование стока реки привело к уменьшению его внутригодовой неравномерности, способствовало выравниванию гидрографа.

В межень в течение суток уровень воды в реке изменялся незначительно (в среднем в пределах 1–2 см), а на устьевом взморье и устьевом участке реки имел выраженный суточный ход со средним размахом на водпосту в г. Севастополе 2 см, который формируется колебаниями уровня моря и бухты. При паводках и сбросе воды из Чернореченского водохранилища, когда сток реки в течение суток увеличивался в 5–10 раз, суточные колебания уровня воды на устьевом взморье достигали 20–40 см, а на устьевом участке реки — 200–300 см. При стонно-нагонных явлениях (раз в 9–14 суток) уровень воды изменялся в пределах ± 100 см, а сейшевые и бризовые колебания уровня составляли ± 10 –20 см (Миньковская, 2020).

В период натурных исследований Отдела гидрофизики шельфа МГИ РАН в 2017–2021 гг. в устьевой области р. Черной отмечался маловодный цикл стока реки. Температура воздуха была на 1.0–2.2° выше нормы, а осадков выпадало на 20–60 % меньше нормы. Расход воды в межень уменьшился до 0.2–0.3 м³/с. Уровень воды на водпосту «Севастополь» и на устьевом участке реки изменялся в течение дня соответственно в пределах ± 1–20 см. Однако при производстве работ, продолжительность которых в каждом гидрометрическом створе исследуемого района не превышала одного часа, уровень воды обычно оставался неизменным или размах его колебаний не превышал ± 1 см. То есть из-за краткосрочности измерительных работ в каждом створе можно считать, что полученные схемы распределения в поперечных сечениях потока на устьевом участке реки были «мгновенными».

В ходе исследований установлено, что изменения уровня воды в результате эффекта конфузурности в устье Инкерманского лимана превышают (иногда на порядок) его изменчивость в Севастопольской бухте, на водпосту «Севастополь» (Павловский мыс). Так, в первую половину дня уровень воды в центральной части устьевого участка реки обычно увеличивался на 10–20 см, а во вторую половину дня — уменьшался примерно на ту же величину. Очевидно, эти колебания уровня воды носят, как показано в работе (Medvedev and Kulikov, 2016), приливно-бризовый характер. Соответственно изменялось и направление переноса воды: рост уровня соответствовал ее поступлению из бухты на устьевой участок реки, а падение — оттоку воды по направлению к морю.

При средних гидрометеорологических условиях отмечался разнонаправленный перенос воды, тепла, солей и веществ в нижних створах устьевого участка реки, играющий важную роль в формировании состояния как самого устья, так и прилегающей части моря. Прямой поток направлен от реки к морю и обусловлен стоком реки, сгонами, сейшами, отливом и компенсационными течениями, формирующимися в результате недостаточной емкости устьевого участка реки для аккумуляции поступающей из бухты водной массы. Обратный поток генерируется нагонными, приливными, сейшевыми и бризовыми колебаниями уровня моря и бухты, а также компенсационными течениями, из-за недостаточной пропускной способности пролива, соединяющего Севастопольскую бухту с прилегающей частью Черного моря. Узкий пролив (около 400 м) не может быстро пропустить в море массу воды, накопившуюся в бухте в результате «волны наполнения» (Михайлов, 1998), поэтому в придонном слое развивается компенсационный поток, направленный к реке. Обычно в меженный период, при маловетрии, в первой половине дня преобладал обратный поток, а после полудня — прямой.

В связи с планируемым сооружением оптово-распределительного центра в г. Инкермане, дноуглубительными работами и реконструкцией причалов на фоне уменьшения стока р. Черной возможно ухудшение экологических условий устья реки, обусловленное изменениями водо- и солеобмена между рекой и Севастопольской бухтой. Это может привести к осолонению и загрязнению воды как устьевого взморья, так и устьевого участка реки. Поэтому целью работы являлась разработка и апробация методики количественной оценки адвективных составляющих обменных процессов в зоне взаимодействия разнородных вод в устье малой реки. Для этого были организованы многолетние (с 2017 по 2021 г.) натурные исследования, из материалов которых была выбрана экспедиция (19.06.2019), репрезентатив-

ная для меженного периода водного режима р. Черной, предложена и апробирована методика расчета обменных составляющих по натурным данным этой экспедиции и выполнена оценка достоверности полученных результатов.

2. Материалы и методы

Информационной базой работы являлись материалы семи экспедиций, выполнявшихся с 2017 по 2021 г., данные были получены с помощью различных приборов и оборудования. При этом оказалось, что расхождения между величинами, полученными при квазисинхронных измерениях в створах различными приборами, достигали 2–17%. Это обусловлено динамичностью процессов взаимодействия разнородных вод в устье реки и различиями в методиках измерения характеристик (пульсационных или осредненных) водной среды различными приборами.

Для измерения электрической проводимости, температуры и гидростатического давления воды использовался гидрозонд портативный «ГАП-АК-12Р» в автономном режиме работы. Точность измерения температуры воды ± 0.015 °С, гидростатического давления $\pm 0,0008$ Мпа, электропроводности $\pm 7.5 \cdot 10^{-4}$ мСм/см.

Исследование динамики водного потока в придонном слое выполнялось с помощью разработанного макета прибора «Визуализатор потока» (Antonenkov, 2020; Антоненков, 2020), позволяющего получать распределение скорости течения в потоке, а также визуализировать турбулентные процессы в придонном слое и в толще воды.

Измерения температуры воды, гидростатического давления, электропроводности, мутности, скорости и направления течения на фиксированных горизонтах проводились биофизическим комплексом «Кондор» (Cheruzhenko and Cheruzhenko, 2017). Дискретность измерений составляла 0.2–0.3 м, выдержка прибора в точке — 30–40 с. Точность измерения температуры воды ± 0.05 °С, гидростатического давления ± 0.01 Мпа, электропроводности ± 0.001 мСм/см, мутности ± 0.1 ЕМФ, скорости течения ± 0.05 м/с.

Так как анализ квазисинхронных измерений исследуемых характеристик показал, что результаты, полученные различными измерительными средствами, могут значительно отличаться (до 17%), для апробации разработанной методики оценки составляющих обменных процессов использовались наиболее детальные данные измерений комплексом «Кондор».

Все работы производились в меженный период стока р. Черной при штиле или маловетрии, в качестве репрезентативной была выбрана экспедиция за 19.06.2019, и расчет выполнялся для створа 4 (рис. 1), в котором взаимодействие разнородных вод имеет наиболее динамичный характер. Исследования, выполненные в 2017–2021 гг. с моста и в перпендикулярном створе, равном ширине потока, свидетельствуют об однородности течений на расстоянии 200 м ниже моста.

Для аналитического решения задачи определения обменных составляющих в устье р. Черной, гидрометрический створ 4 (рис. 1, а) разбивался по ширине на 21 вертикаль (с учетом изменчивости измеряемых характеристик) с расстояниями между ними 5 м (рис. 1, б). Промежуточные значения между измеренными величинами находились путем линейной интерполяции. Для получения более точной эпюры скорости течения глубина каждой ячейки принималась равной 0.1 м, т. е.

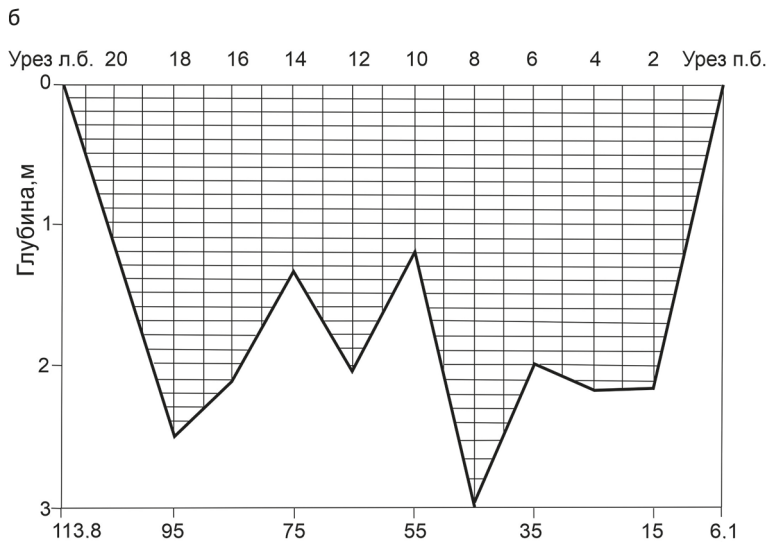
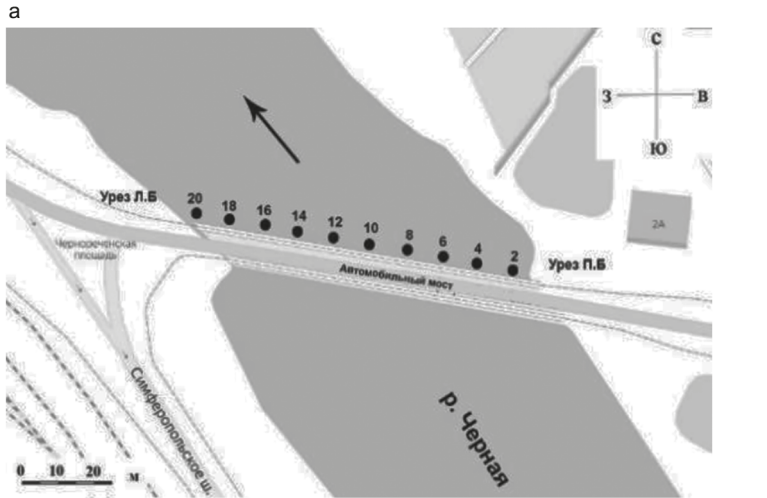


Рис. 1. Схема станций (а) и поперечный профиль створа 4 (б) в устье р. Черной

поперечный профиль имел от 11 до 30 горизонтов (рис. 1, б). Векторы скорости проектировались на ось 150–330°, а также учитывалось неперпендикулярное ширине потока расположение створа 4, для чего площадь каждой ячейки (или ее части) умножалась на $\cos 45^\circ$, равный 0.7071. Средние значения скорости течения, солёности и температуры относились к центрам ячеек. Количественная оценка переноса массы выполнялась методом «скорость — площадь», дающим приближенное значение объема «модели расхода воды».

Элементарные расходы воды (q_v) любого направления в каждой ячейке рассчитывались по формуле

$$\pm q_v = \int_{\omega} v d\omega; \quad (1)$$

расходы тепла (q_t) —

$$\pm q_t = \rho c(T) \int_{\omega} v t d\omega; \quad (2)$$

расходы солей (q_c) —

$$\pm q_c = k\rho \int_{\omega} v c d\omega, \quad (3)$$

где q_b, q_t, q_c — перенос массы (m^3/c), тепла (МВт) и солей (кг/с) любого направления (\pm) через элементарную ячейку поперечного сечения потока в единицу времени; v — средняя скорость течения в ячейке (м/с), имеющая положительный знак при прямом потоке (из реки в бухту) и отрицательный — при обратном потоке (из бухты в реку); ω — площадь сечения (m^2) элементарной ячейки (или ее частей, занятых разнонаправленными потоками); t — средняя температура воды ($^{\circ}C$) в ячейке; ρ — плотность воды, равная 1000 кг/м^3 ; $c(T)$ — удельная теплоемкость воды, равная $4.18 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$; c — средняя соленость воды (г/кг) в ячейке; k — коэффициент размерности.

Таким образом, разнонаправленные расходы воды (тепла и солей) имеют разные знаки: прямой — с плюсом, обратный — с минусом.

Расходы воды (Q_b), тепла (Q_t) и солей (Q_c) прямого и обратного направлений (\pm) рассчитывались суммированием элементарных расходов воды (q_b), тепла (q_t) и солей (q_c) в ячейках сечения створа 4:

$$\pm Q_b = \Sigma \pm q_b, \quad (4)$$

$$\pm Q_t = \Sigma \pm q_t, \quad (5)$$

$$\pm Q_c = \Sigma \pm q_c. \quad (6)$$

Результирующий перенос воды ($\pm Q_b^{\text{рез}}$), тепла ($\pm Q_t^{\text{рез}}$) и солей ($\pm Q_c^{\text{рез}}$) в рассматриваемом створе определялся как алгебраическая сумма разнонаправленных потоков и имел направление и знак большего по значению расхода:

$$\pm Q_b^{\text{рез}} = Q_b^+ + Q_b^-, \quad (7)$$

$$\pm Q_t^{\text{рез}} = Q_t^+ + Q_t^-, \quad (8)$$

$$\pm Q_c^{\text{рез}} = Q_c^+ + Q_c^-. \quad (9)$$

Для расчетов использовался пакет прикладных программ Matlab R2016a. Линейная интерполяция данных по горизонтали выполнялась через 5 м, а по вертикали через 0.1 м, затем в каждой ячейке рассчитывалась средняя скорость, температура и соленость воды соответствующего потока. Прямой, обратный и результирующий перенос рассчитывались по формулам (1)–(9). Схемы распределения температуры, солености, скорости потока, расходов воды, тепла и солей строились с помощью пакета программ Golden Software Surfer 13. Использовалась интерполяция Triangulation and Linear Interpolation, а также Grid Filter Moving Average.

Для оценки достоверности определения расходов воды, тепла и солей аналитическим методом применялся более точный графический способ решения этой

задачи (Слепчук и др., 2021). Он заключался в графической (нелинейной) интерполяции между значениями характеристик для построения эпюр скорости, солёности и температуры воды, в построении полей распределения скорости и элементарных расходов тепла и солей, определении площадей между смежными изолиниями планиметрированием и расчете переноса воды, тепла и солей через эти площади. Прямой и обратный расходы воды (тепла и солей) находились как сумма соответствующих частных расходов между изолиниями.

3. Результаты и обсуждение

Зачастую корректность отображения реальной картины пространственной изменчивости изучаемых характеристик на схемах распределения измеренных и рассчитанных характеристик природной среды, полученных с помощью вычислительных средств и приведенных в литературных источниках (Морозов и др., 2012; Dovhyi et al., 2020; Ломакин и др., 2020), вызывает сомнение. На этих схемах изолинии пересекаются, сливаются, проходят под прямым или острым углами, поля распределения характеристик изобилуют микроскопическими замкнутыми областями, не обоснованными реальными измерениями и физическими свойствами водной среды. Например, рис. 3–7 в работе (Морозов и др., 2012), рис. 3 в работе (Dovhyi et al., 2020) и рис. 3–5 в работе (Ломакин и др., 2020). Эти иллюстрации существенно отличаются от схем распределения, построенных по тем же натурным данным, графическим методом. Такие недостатки обусловлены особенностями интерполяции, осреднения и сглаживания изолиний при использовании различных программных комплексов, а также субъективными факторами.

Поэтому в данной работе поля распределения скорости, температуры и солёности воды, а также соответствующих разнонаправленных расходов в поперечном сечении створа 4 (рис. 1) получены двумя способами: с использованием стандартных программ и графическим методом.

Расход воды в период экспедиции 19.06.2019 в вершине устья составлял $0.24 \text{ м}^3/\text{с}$ и был близок к среднему суточному расходу воды в межень на водпосту с. Хмельницкое, $0.27 \text{ м}^3/\text{с}$. В этот период изменчивость уровня воды в Севастопольской бухте (рис. 2) была характерна для межени и маловетреной погоды теплого

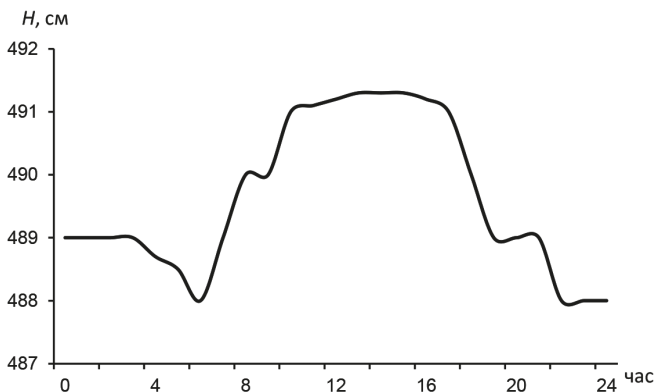


Рис. 2. Уровень воды Севастопольской бухты (Н, см) 19.06.2019 (по данным водпоста «Севастополь»)

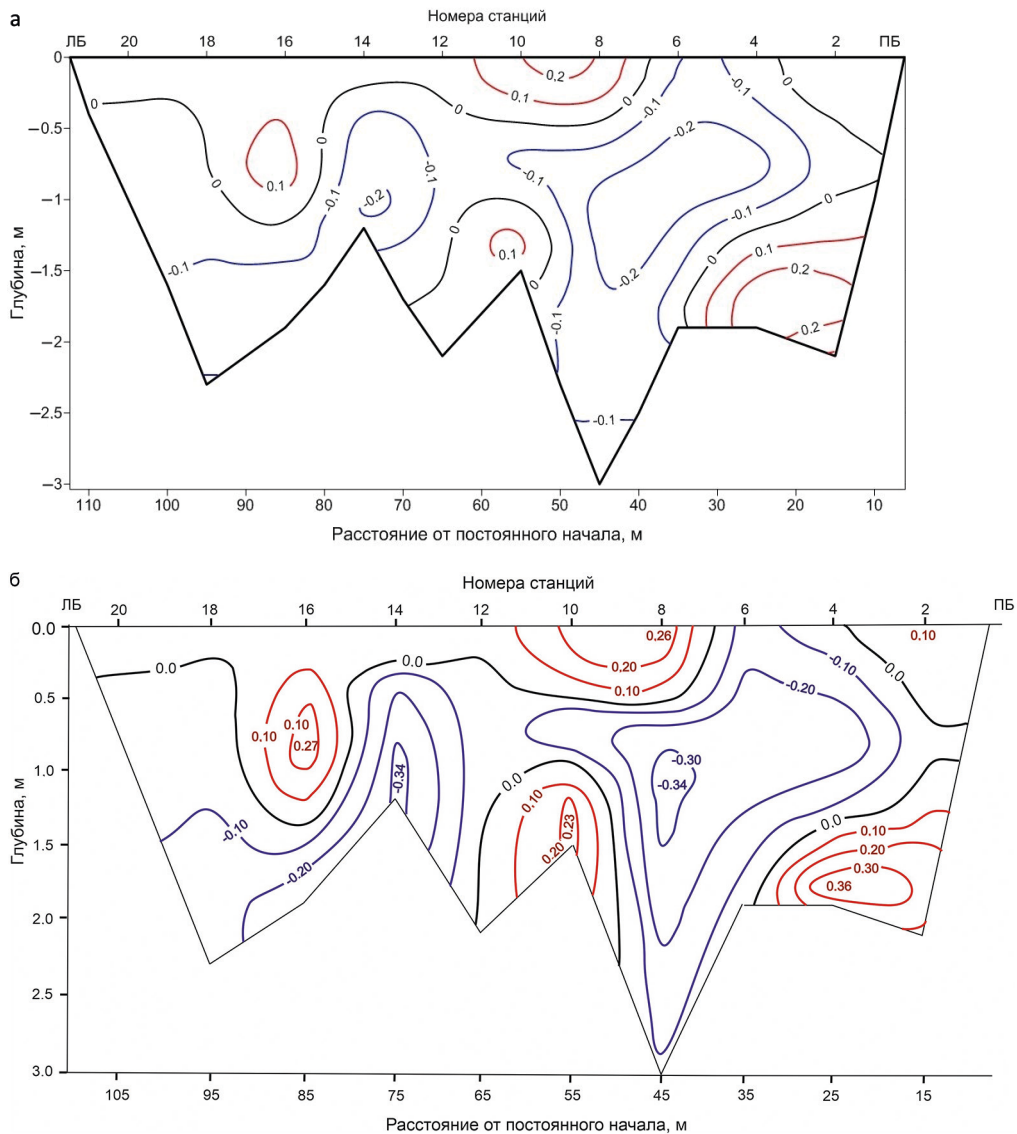


Рис. 3. Распределение скорости течения, полученное аналитическим (а) и графическим (б) методами, м/с. Красными линиями на рисунках 3–6 обозначен прямой поток, синими — обратный

времени года. За 8 ч уровень воды на водпосту «Севастополь» поднялся на 3 см, а в последующие 8 ч он понизился на такую же величину. Поскольку измерения в створе 4 выполнялись в период подъема уровня воды, отмечалась активизация обратного потока.

На рис. 3–6 представлены схемы распределения скорости течения, расходов воды и солей, полученные аналитическим методом и построенные с помощью стандартных программ и графическим методом.

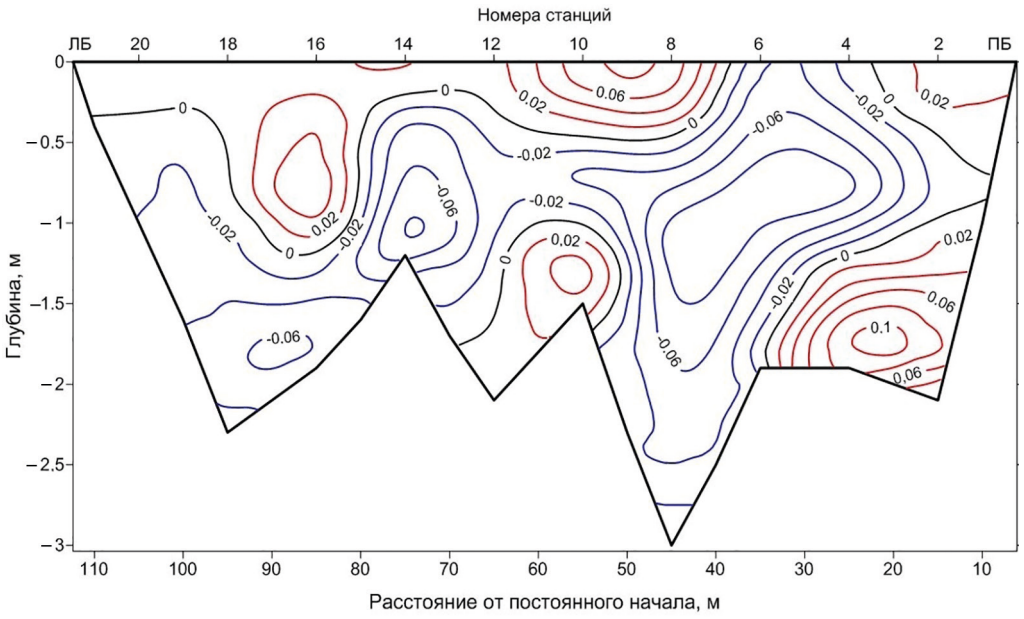


Рис. 4. Расход воды, м³/с

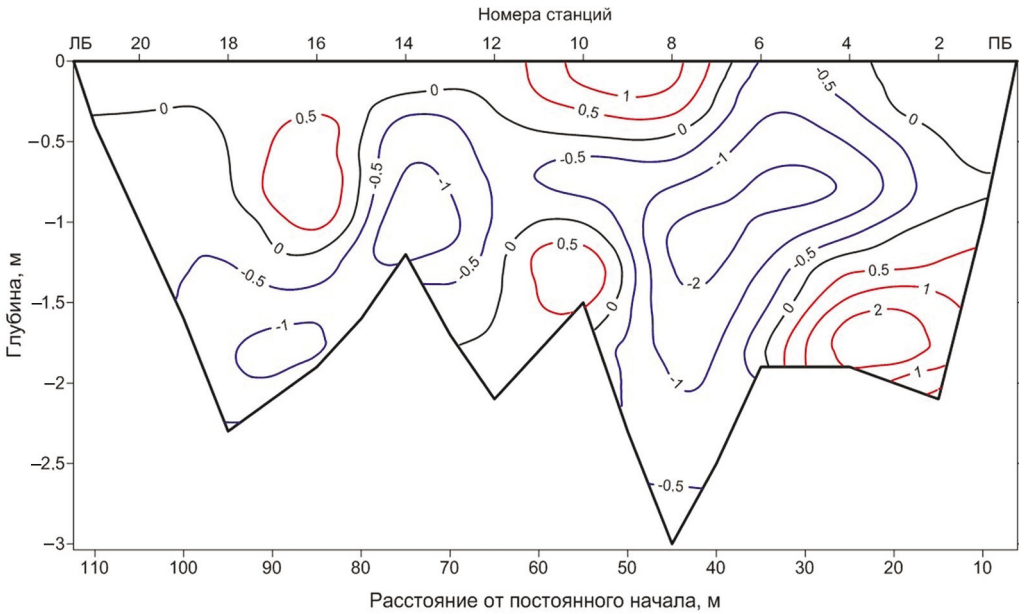


Рис. 5. Расход солей, кг/с

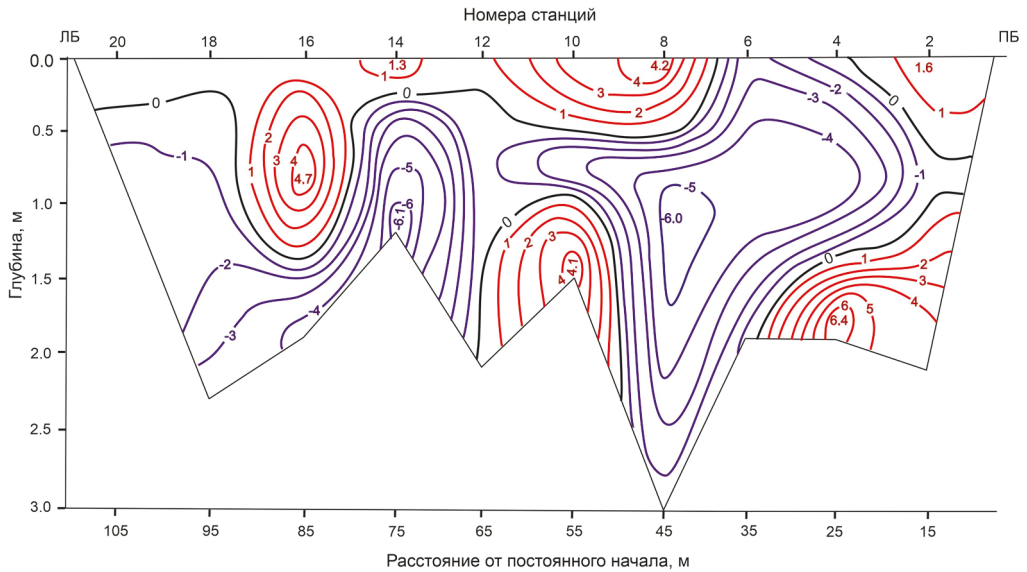


Рис. 6. Расход солей, $\text{‰} \cdot \text{м/с}$, полученный графическим методом

Измеренная скорость течения в поперечном сечении потока в створе 4 изменялась от -0.34 до 0.36 м/с (рис. 3, а). Разнонаправленные потоки воды перемещались примерно с одинаковыми скоростями. Однако площадь поперечного сечения в створе, занятого обратным потоком, была больше, чем площадь сечения, в которой преобладал прямой поток. При производстве работ в этом створе существенных изменений гидрометеорологических характеристик не отмечалось, что подтверждается повторными измерениями параметров среды на тех же станциях «обратным ходом».

Наибольший вклад в изменчивость расхода воды вносила скорость течения, о чем свидетельствует хорошее совпадение схем распределения этих характеристик обменных процессов (рис. 3 и 4). Расход воды являлся основной составляющей расхода тепла и солей (рис. 5), поэтому схемы распределения расхода воды, тепла и солей идентичны (рис. 4 и 5).

Как следует из анализа рис. 3–6, схемы, полученные по результатам аналитического расчета, выполненного с помощью уравнений (1)–(9), практически идентичны схемам распределения рассматриваемых характеристик, построенных графическим методом. Также хорошо совпадают поля распределения солености, мутности, температуры воды, расходов тепла и взвешенных веществ, полученные разными способами. Следовательно, аналогичность распределений исследуемых характеристик свидетельствует о возможности использования автоматической обработки исходной информации без снижения качества и достоверности результатов.

Результаты апробации методики по натурным данным экспедиционных исследований 19.06.2019 представлены в табл. 1. Для определения точности расчетов за основу принимался графический метод. Ошибка в оценке разнонаправленных расходов воды аналитическим методом составила 5–7%, расходов тепла и солей — 2–7% при допустимой ошибке расчета расхода воды 5% (таблица). Величины, полученные графическим способом, были несколько больше рассчитанных аналити-

чески из-за того, что в первом случае применялась более точная нелинейная интерполяция при построении эпюр рассматриваемых характеристик.

Таблица. Результаты оценки водо-, соле- и теплообмена в устье р. Черной аналитическим (числитель) и графическим (знаменатель) методами

Составляющая обменных процессов	Направление переноса		Результирующий перенос
	прямой	обратный	
Расход воды, м ³ /с	5.0/5.2	-10.7/-11.3	-5.7/-6.1
Расход солей, кг/с	85/87	-184/-193	-99/-106
Расход тепла, МВт	520/532	-1112/-1172	-592/-640

Результирующий перенос воды, солей и тепла в межень период стока, направленный в сторону реки, оказывает существенное влияние на состояние ее устьевого участка. Так, в период экспедиции расход осолоненной воды, поступавшей из бухты в реку, был в 3 раза больше ее среднего годового расхода у с. Хмельницкое и в 25 раз больше расхода воды, поступавшего в вершину устья во время производства работ. Переместившаяся на устьевой участок реки распресненная вода Севастопольской бухты 19.06.2019 (с 6 до 14 ч) вызвала подъем уровня воды в центре устьевого участка на 15 см, в то время как на водпосту «Севастополь» уровень воды повышался в этот период на 3 см (см. рис. 2). Соответственно, на такие же величины уменьшался уровень воды на устьевом участке реки и в Севастопольской бухте с 14 до 22 ч 19.06.2019. Реверсии потока на устьевом участке р. Черной, по-видимому, способствуют его «промывке» и самоочищению. Однако при изменении дальности распространения этого процесса в глубь суши, например из-за дноуглубительных работ, возможно осолонение пресноводной части устьевого участка реки.

4. Выводы

Предлагаемый способ оценки составляющих обменных процессов по натурным данным инвариантен, что позволяет использовать его в любом створе морского устья реки, независимо от его типа.

При наличии натурных данных в сечении потока, охватывающих не менее 75 % размаха измеряемых характеристик водной среды, можно приближенно оценить баланс воды, тепла, солей, взвешенных, биогенных и загрязняющих веществ как в устьях рек разного типа, так и в море.

Для прогнозирования возможных изменений состояния устьев малых рек под влиянием природных и антропогенных факторов водообмен является предиктивным компонентом среды, требующим точного количественного определения.

Повысить качество визуализации распределения измеряемых характеристик состояния водной среды, а также подтвердить достоверность оценки составляющих обменных процессов можно путем сопоставления схем распределения, построенных с использованием стандартных программных комплексов, с графическим построением тех же схем.

В дальнейшем планируется использовать предлагаемую разработку для расчета обменных составляющих аналитическим методом по всем имеющимся материалам наблюдений.

Оценка водо-, соле- и теплообмена в устьях рек по натурным данным также предназначена для калибровки и верификации моделей, позволяющих не только вскрыть механизм обменных процессов, но и получить значения обменных составляющих для экстремальных ситуаций, наиболее существенно влияющих на состояние устьевых водных объектов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллегам, принявшим участие в экспедиционных работах по исследованию обменных процессов в морском устье р. Черной: А. И. Чепыженко, Р. О. Шаповалову, Л. А. Вержевской, С. И. Кропотову, В. В. Никишину, Д. М. Шукало.

Литература

- Антоненков, Д. А. (2020). Измерительный комплекс для исследования динамических характеристик и структуры течения водного потока в прибрежной морской зоне. *Известия вузов. Приборостроение*, 63 (12), 1112–1118. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118>
- Ломакин, П. Д., Чепыженко, А. И., Гребнева Е. А. (2020). Поля океанологических характеристик в Абрамовой бухте (Севастополь) в ноябре 2019 года. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*, 2, 68–79. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-68-79>
- Миньковская, Р. Я. (2020). *Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек северо-западной части Черного моря)*. [online] Севастополь, ФГБУН ФИЦ МГИ. Доступно на: http://mhi-ras.ru/assets/files/Minkovskaya_Kompleksnyye_issledovaniya.pdf [Дата доступа 10.01.2020]. <https://doi.org/10.22449/978-5-6043409-2-9>
- Мискевич, И. В. (2019). Специфика природных процессов в приливных устьях малых рек Белого моря. *Проблемы региональной экологии*, 4, 37–41.
- Михайлов, В. Н. (1998). *Гидрология устьев рек*. М.: Изд-во МГУ.
- Морозов, А. Н., Лемешко, Е. М., Шутов, С. А., Зима, В. В. (2012). Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008 года). *Морской гидрофизический журнал*, 3, 25–30.
- Панченко, Е. Д., Льюменс, М., Лебедева, С. В. (2020). Моделирование гидродинамических процессов в приливном устье реки Онеги. В: *Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов международной конференции памяти Ю. Б. Виноградова*. СПб.: ВВМ, 135–140.
- Симов, В. Г., Морозов, В. И., Фомина, И. Н. (2016). *Обменные процессы в проливах между эстуариями и морями*. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика».
- Слепчук, К. А., Миньковская, Р. Я., Антоненков, Д. А., Чепыженко, А. И. (2021). Оценка обменных процессов в морских устьях рек по натурным данным (на примере устья р. Черной). В: *Моря России: Год науки и технологий в РФ — Десятилетие наук об океане ООН: тезисы докладов всероссийской научной конференции*. Севастополь, 457.
- Antonenkov, D. A. (2020). Water flow speed determining using visualization methods. *Scientific Visualization*, 12 (5), 102–111. <https://doi.org/10.26583/sv.12.5.09>
- Chepyzhenko, A. A. and Chepyzhenko, A. I. (2017). Methods and device for in situ total suspended matter (TSM) monitoring in natural waters' environment. In: *23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics: Proc. SPIE 10466, 104663G*. <https://doi.org/10.1117/12.2287127>
- Dovhyi, I. I., Kremenchutskii, D. A., Bezhin, N. A., Kozlovskaiya, O. N., Milyutin, V. V., Kozlitin, E. A. (2020). Distribution of ¹³⁷Cs in the Surface Layer of the Black Sea in Summer 2017. *Physical oceanography*, 27 (2), 152–160. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-2-166-175>

- Eremina, E. S. and Evstigneev, V.P. (2020). Inter-Annual Variability of Water Exchange between the Azov Sea and the Sivash Bay through the Tonky Strait. *Physical Oceanography*, 27 (5), 489–500. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-5-489-500>
- Medvedev, I.P. and Kulikov, E. A. (2016). Spectrum of mesoscale sea level oscillations in the Northern Black Sea: tides, seiches, and inertial oscillations. *Oceanology*, 56, 6–13. <https://doi.org/10.1134/S0001437016010094>
- Minkovskaya, R. Y. and Demidov, A. N. (2014). Water, salt, and heat exchange through the Kinburn Strait of the Dnieper-Bug estuary. *Oceanology*, 54 (5), 567–575. <https://doi.org/10.1134/S0001437014050117>

Статья поступила в редакцию 26 апреля 2022 г.
Статья рекомендована к печати 9 января 2023 г.

Контактная информация:

Миньковская Роза Яковлевна — rosmink@yandex.ru
Слепчук Кира Александровна — skira@mhi-ras.ru
Антоненков Дмитрий Александрович — dmitry_science@mail.ru

Advective components determination of mass, heat and substances exchange according to natural data at the mouth of the Chyornaya River (Sevastopol Region)*

R. Ya. Minkovskaya, K. A. Slepchuk, D. A. Antonenkov

Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences,
2, Kapitanskaya ul., Sevastopol, 299011, Russian Federation

For citation: Minkovskaya, R. Ya., Slepchuk, K. A., Antonenkov, D. A. (2023). Advective components determination of mass, heat and substances exchange according to natural data at the mouth of the Chyornaya River (Sevastopol Region). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 68 (1), 122–135. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.107> (In Russian)

Physical and mathematical modeling of nonstationary exchange processes in the zone of interaction of heterogeneous waters at the mouths of rivers remains problematic. Therefore, the paper proposes and tests a method for estimating multidirectional water, heat and salts consumption in this zone based on field data. For this purpose, a program of long-term expeditionary research was developed, full-scale measurements were carried out in 2017–2021, an algorithm and a calculation program were developed and methods for quantifying the components of metabolic processes were tested according to full-scale studies in 2019 at the mouth of the Black river, in the zone of interaction of river water and desalinated water of the Sevastopol Bay. The article provides a methodology and an example of the assessment of water, salt and heat exchange for a representative expedition carried out under average hydrometeorological conditions during the low-water periods. Calculations are made by the analytical method, using standard programs, and by the graphical method, by graphical interpolation and planimetry of areas. The discrepancies between the results obtained by different methods were 2–7%, which indicates the possibility of using this technique to process long-term data with sufficient accuracy. The proposed method for quantifying the components of exchange processes based on natural data can be used in any formation of different types of river mouths for balance calculations, forecasting possible changes in their state and adjacent parts of the

* The research was carried out within the topic FNNN-2021-0005 “Complex interdisciplinary studies of oceanologic processes which determine functioning and evolution of ecosystems in the coastal zones of the Black Sea and the Sea of Azov”.

sea under the influence of natural and anthropogenic factors, as well as for calibration and verification of models.

Keywords: water exchange, salt exchange, heat exchange, calculation algorithm, quantitative assessment methodology, components of metabolic processes, mouth of the Chyornaya River, interaction zone.

References

- Antonenkov, D. A. (2020). Measuring complex for studying the dynamic characteristics and structure of the water flow in the coastal marine zone. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 63 (12), 1112–1118. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118>
- Antonenkov, D. A. (2020). Water flow speed determining using visualization methods. *Scientific Visualization*, 12 (5), 102–111. <https://doi.org/10.26583/sv.12.5.09>
- Chepyzhenko, A. A. and Chepyzhenko, A. I. (2017). Methods and device for in situ total suspended matter (TSM) monitoring in natural waters' environment. In: *23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics: Proc. SPIE 10466, 104663G*. <https://doi.org/10.1117/12.2287127>
- Dovhyi, I. I., Kremenchutskii, D. A., Bezhin, N. A., Kozlovskaya, O. N., Milyutin, V. V., Kozlitsin, E. A. (2020). Distribution of ¹³⁷Cs in the Surface Layer of the Black Sea in Summer 2017. *Physical oceanography*, 27 (2), 152–160. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-2-166-175>
- Eremina, E. S. and Evstigneev, V. P. (2020). Inter-Annual Variability of Water Exchange between the Azov Sea and the Sivash Bay through the Tonky Strait. *Physical Oceanography*, 27 (5), 489–500. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-5-489-500>
- Lomakin, P. D., Chepyzhenko, A. I., Grebneva, E. A. (2020). Fields of oceanographic characteristics in Abramova Bay (Sevastopol) in November 2019. *Ecological safety of the coastal and shelf zones of the sea*, 2, 68–79. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2020-2-68-79> (In Russian)
- Medvedev, I. P. and Kulikov, E. A. (2016). Spectrum of mesoscale sea level oscillations in the Northern Black Sea: tides, seiches, and inertial oscillations. *Oceanology*, 56, 6–13. <https://doi.org/10.1134/S0001437016010094>
- Mikhailov, V. N. (1998). *Hydrology of river mouths*. Moscow: Lomonosov Moscow University Press.
- Minkovskaya, R. Y. and Demidov, A. N. (2014). Water, salt, and heat exchange through the Kinburn Strait of the Dnieper-Bug estuary. *Oceanology*, 54 (5), 567–575. <https://doi.org/10.1134/S0001437014050117>
- Minkovskaya, R. Ya. (2020). *Comprehensive studies of different types of marine estuaries (on the example of marine estuaries of the north-western part of the Black Sea)*. [online] Sevastopol: FGBUN FRC MGI Publ. Available at: http://mhi-ras.ru/assets/files/Minkovskaya_Kompleksnye_issledovaniya.pdf. <https://doi.org/10.22449/978-5-6043409-2-9> [Accessed 01.10.2020].
- Miskevich, I. V. (2019). Specificity of natural processes in tidal mouths of small rivers of the White Sea. *Problems of regional ecology*, 4, 37–41.
- Morozov, A. N., Lemeshko, E. M., Shutov, S. A., Zima, V. V. (2012). Currents in the Sevastopol Bay according to ADCP observations (June 2008). *Marine Hydro-Physical Journal*, 3, 25–30.
- Panchenko, E. D., Leumens, M., Lebedeva, S. V. (2020). Modeling of hydrodynamic processes in the tidal mouth of the Onega River. Fourth Vinogradov Readings. In: *Hydrology from cognition to worldview: collection of reports of the international conference in memory of Yu. B. Vinogradov*. St. Petersburg: VVM Publ., 135–140.
- Simov, V. G., Morozov, V. I., Fomina, I. N. (2016). *Exchange processes in the straits between estuaries and seas*. Sevastopol: SPC EKOSI-Gidrofizika Publ.
- Slepchuk, K. A., Minkovskaya, R. Ya., Antonenkov, D. A., Chepyzhenko, A. I. (2021). Evaluation of metabolic processes in sea estuaries from field data (on the example of the mouth of the Chyornaya River). In: *Seas of Russia: Year of Science and Technology in the Russian Federation — UN Decade of Ocean Sciences: Abstracts of the All-Russian Scientific Conference*. Sevastopol, 457. (In Russian)

Received: April 26, 2022

Accepted: January 9, 2023

Authors' information:

Rosa Ya. Minkovskaya — rosmink@yandex.ru

Kira A. Slepchuk — skira@mhi-ras.ru

Dmitry A. Antonenkov — dmitry_science@mail.ru