——— ФИЗИКА МОРЯ ——

УДК 551.465

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДООБМЕНА В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ ПО ИСТОРИЧЕСКИМ ДАННЫМ И ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ 2019 г.

© 2021 г. И. Б. Завьялов^{1,} *, А. А. Осадчиев¹, П. О. Завьялов¹, В. В. Кременецкий¹, И. В. Гончаренко¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия *e-mail: i.zav@ocean.ru Поступила в редакцию 06.07.2020 г. После доработки 14.10.2020 г. Принята к публикации 19.11.2020 г.

В работе представлены результаты исследования процесса водообмена между Азовским и Черным морями на основе данных контактных измерений в 2019 г. Получены оценки масштаба азовоморского плюма в условиях сильного северо-восточного ветра (9–10 м/с). Результаты измерений подтвердили определяющую роль ветра в процессах водоообмена через Керченский пролив, что позволило сформировать статистику по стоку азовоморских вод в Черное море на основе данных реанализа ветра за последние двадцать лет. На основе сопоставления спутниковых и натурных данных предложен и применен новый метод расчета расхода азовоморской воды через Керченский пролив. Расчет расхода азовоморской воды основывается, главным образом, на оценке пространственных характеристик азовоморского плюма в Черном море и, в частности, на определении зависимости его площади от параметров ветра. Рассчитанное по новому методу среднее значение годового расхода азовоморской воды практически совпадает со средним значением из всех оценок водообмена через Керченский пролив, полученных с применением иных методов расчета. Также рассмотрен обратный случай притока черноморских вод в Азовское море после завершения периода интенсивного стока азовоморских вод в Черное море.

Ключевые слова: водообмен, Керченский пролив, Азовское море, Черное море **DOI:** 10.31857/S0030157421030199

1. ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая работа посвящена изучению водообмена в Керченском проливе на основе данных контактных измерений и является продолжением ранее опубликованной статьи [31], в которой мы проводили аналогичные исследования с использованием спутниковых данных и численной модели. Данная тема продолжает вызывать интерес, несмотря на то, что ее исследованию посвящено множество работ [1-19, 21-29]. Для изучения водообмена между Черным и Азовским морями применялись различные методы исследования. Существуют эмпирические методы, которые, главным образом, основываются на связях течений с различными гидрометеорологическими условиями (ветровым потоком, уровнем моря, атмосферным давлением) [8, 16, 17, 27]. Также широко использовался метод, учитывающий зависимость водообмена от составляющих пресноводного баланса (речной сток, испарение, осадки), что подразумевает совместное решение уравнений водного и солевого балансов [6, 7, 9,

21, 22]. Более современный подход основывается на численном моделировании и комбинированных методах расчета течений и расходов воды [14, 24, 26, 28, 29]. Указанные методы имеют свои недостатки, заключающиеся в сложности точного учета многих факторов, что приводит к существенным различиям в оценке азовоморского и черноморского потоков.

Поэтому проведение и анализ контактных измерений являются важным аспектом в изучении факторов, влияющих на процесс водообмена в Керченском проливе.

Последнее систематическое исследование водообмена в Керченском проливе проводилось в период с 1981 по 2006 гг. и заключалось в регулярном измерении течений в северной части пролива [15]. Также существует статистика по водообмену в более ранний период (1923–1981 гг.), которая, в большей степени, строилась на косвенных расчетах, основанных либо на водно-балансовых методах, либо на решениях гидродинамических уравнений движения [10].



Рис. 1. Скорость и направление ветра в районе исследования по данным метеостанции в г. Керчь и данным реанализа NCEP/NCAR с 19 по 25 апреля 2019 г.

Можно сказать, что на сегодняшний день мы не имеем полного представления о том, как происходит водообмен между Азовским и Черным морями. К тому же, с течением времени могут изменяться условия и факторы, влияющие на изучаемый процесс. Так, например, происходящие климатические изменения атмосферной циркуляции в исследуемом регионе и компонент водного баланса Азовского моря будут оказывать влияние на процесс водообмена в Керченском проливе.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ранее опубликованной статье [31] мы получили результаты, которые требовали подтверждения на натурных данных для применения нового метода расчета расхода азовоморской воды через Керченский пролив. В дальнейшем мы будем ссылаться на данную статью, поскольку результаты, полученные в ней и в этой работе, во многом дополняют друг друга. В данной работе мы будем рассматривать, главным образом, результаты экспедиции, которая проходила с 22 по 25 апреля 2019 г. В первые два дня экспедиции происходило ослабление сильного северо-восточного ветра, что позволило наблюдать изменение направления и интенсивности водообмена в Керченском проливе. В [31] был сделан вывод о том, что интенсивный сток азовоморских вод в Черное море происходит вследствие воздействия сильного северовосточного ветра. В данном случае северо-восточным ветром мы называем ветер, направление которого соответствует диапазону 10°-80° по азимуту. Именно такой ветер был отмечен в исследуемом районе с 19 по 23 апреля (рис. 1). Также благоприятным было и то, что в этот период стояла безоблачная погода, и мы имели возможность получить спутниковые снимки района исследования (рис. 2).

Район исследования охватывал прибрежную акваторию Черного моря от мыса Чауда на Крым-



Рис. 2. Спутниковые изображения района исследований, полученные спектрорадиометром MODIS со спутника MODIS Aqua (трассер – взвесь): а) 22.04.2019, б) 24.04.2019, в) 27.04.2019.

ском полуострове до мыса Железный Рог на Таманском полуострове (рис. 3). Подробные измерения были проведены в Керченском проливе 23 и 24 апреля 2019 г. в форме двух разрезов поперек пролива. Гидрофизические измерения на каждой станции проводились посредством СТД-зонда (SBE Seacat 19plus) и ADCP-зонда (Teledyne RDI Workhorse Sentinel). Также на одной из станций, расположенной у мыса Опук на Крымском полуострове, с 23 по 25 апреля была установлена заякоренная термокоса, состоящая из 15 термодатчиков, расположенных равномерно от поверхности до дна (станция 6 на рис. 3). Кроме натурных данных, в работе использовались спутниковые изображения (спектрорадиометр MODIS, NASA) исследуемого региона. Ветровые данные были получены из реанализа NCEP/NCAR, которые показали хорошее соответствие с данными прямых измерений ветра на метеостанции в г. Керчь (рис. 1).



Рис. 3. Батиметрическая карта района исследований с расположением гидрологических станций (синие точки) и заякоренной термокосы (зеленая точка).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В первый день экспедиции в регионе еще действовал достаточно сильный северо-восточный ветер (рис. 1) и спутниковые снимки показывали наличие области с высокой концентрацией взвешенного вещества у черноморского побережья и в западной части Керченского пролива (рис. 2а). Предположение о том, что формирование данной области является следствием стока азовоморских вод в Черное море, нуждалось в подтверждении контактными измерениями.

Известно, что, помимо концентрации взвешенного вещества, одним из основных показателей, характеризующих различие Черного и Азовского морей, является значение солености воды. Среднее значение солености Азовского моря составляет порядка 11 епс, тогда как соответствующий показатель для Черного моря достигает значения 18 епс на поверхности [12]. Поэтому основным критерием обнаружения азовоморских вод в Черном море является наличие стратификации по солености.

Результаты измерений 22 апреля на разрезе возле мыса Чауда в Черном море (станции 1–5 на рис. 3) показали наличие опресненного слоя шириной до 5 км у поверхности, нижняя граница которого достигала 20 м (рис. 4а). Длина разреза составляла 8 км. Средняя скорость северо-восточного ветра 22 апреля составляла 9–10 м/с (рис. 1).

ОКЕАНОЛОГИЯ том 61 № 3 2021

Результаты измерений 23 апреля на разрезе возле мыса Опук (станции 6–10 на рис. 3) также показали наличие опресненного слоя, но значительно меньших размеров (рис. 4б). Толщина этого слоя в данном случае составляла порядка 15 м, в то время как его ширина на поверхности уменьшилась до 3 км. 23 апреля северо-восточный ветер начал ослабевать, и его средняя скорость не превышала 5 м/с (рис. 1). В 2 км от берега была установлена термокоса (станция 6 на рис. 3), которая показала наличие температурной стратификации и в первые часы измерений зарегистрировала наибольшую область с повышенным значением температуры воды у поверхности за все время наблюдения (рис. 5). Размер данной области практически совпадал по глубине с опресненным слоем на этом же разрезе. Также следует отметить, что температура воздуха повышалась на протяжении всего периода экспедиции и достигла своего пика 25 апреля.

Данные по солености, полученные 23 апреля на первом разрезе в Керченском проливе (станции 11–18 на рис. 3), показали сильно опресненную область в западной части пролива (рис. 6а).

В проливе установилось преимущественно черноморское течение (из Черного моря в Азовское море) до 25 см/с, несмотря на воздействие слабого северо-восточного ветра (рис. 7). Азовоморское течение (из Азовского моря в Черное море) занимало незначительную область в проливе,



Рис. 4. Распределение солености на разрезах в Черном море: а) 22.04.2019, б) 23.04.2019, в) 25.04.2019.



Рис. 5. Температурная карта, построенная по данным термокосы на станции 6.

и скорость течения не превышала 5 см/с на поверхности.

Результаты измерений 24 апреля на втором разрезе в Керченском проливе (станции 24–30 на рис. 3) показали, что распределение солености в значительной степени отличалось от той, которая была получена на первом разрезе. В частности, результаты измерений показали отсутствие опресненного слоя в западной части пролива (рис. 6б). 24 апреля в районе исследований присутствовал слабый южный ветер до 2 м/с (рис. 1).

В этот же день проводились измерения на разрезе в Черном море к востоку от Керченского пролива, возле мыса Железный рог (станции 19— 23 на рис. 3). Результаты измерений не выявили определенных особенностей и показали однородное распределение солености на поверхности.

25 апреля на разрезе возле мыса Такиль, расположенного непосредственно у выхода из Керченского пролива (станции 31–34 на рис. 3), зарегистрирована незначительная опресненная область вблизи поверхности (рис. 4в). На протяжении



Рис. 6. Распределение солености на разрезах в Керченском проливе а) 23.04.2019, б) 24.04.2019.



Рис. 7. Данные по течению в Керченском проливе 23.04.2019 (станции 11–18). Черноморское и азовоморское течения определяются соответственно положительными и отрицательными значениями скоростей. Скорость течения спроецирована на ось, соответствующую направлению "север–юг".

ОКЕАНОЛОГИЯ том 61 № 3 2021

всего дня в регионе наблюдался практически полный штиль (рис. 1).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на то, что в Керченском проливе в значительной степени преобладало черноморское течение (рис. 7), данные измерений показали, что мы были свидетелями интенсивного стока азовоморских вод в Черное море. Действительно, спутниковые данные (рис. 2а) хорошо согласуются с результатами контактных измерений, которые показали наличие опресненного слоя у юговосточного побережья Крымского полуострова и в западной части Керченского пролива 22 и 23 апреля (рис. 4а, 4б, 6а). После завершения периода действия северо-восточного ветра азовоморский плюм более не наблюдался на спутниковых снимках (рис 26, 2в), и результаты контактных измерений также показали отсутствие азовоморских вол у границы Керченского пролива с Черным морем (рис. 4в, 6б).

Согласно результатам измерений течения в Керченском проливе, сток азовоморских вод прекратился уже 23 апреля, когда средняя скорость северо-восточного ветра по данным метеостанции составляла 4.8 м/с (рис. 1). Несмотря на то, что в проливе еще присутствовали азовоморские воды (рис. 6а), северо-восточный ветер уже не мог способствовать их стоку в Черное море, и в поверхностном слое стало формироваться слабое черноморское течение до 25 см/с (рис. 7). Данные наблюдения, в некоторой степени, подтверждают выводы, сделанные нами в предыдущей работе [31], где было эмпирически определено, что сток азовоморских вод происходит под воздействием северо-восточного ветра, скорость которого превышает 5 м/с. Именно при таком пороговом значении скорости ветра мы получали минимальную погрешность (среднеквадратичную ошибку) при построении зависимостей пространственных характеристик азовоморского плюма от параметров ветра. Здесь также будут показательны результаты осенней экспедиции (3–5 сентября 2019 г.), когда проводились аналогичные исследования в условиях слабого северо-восточного ветра (до 4 м/с) и не было обнаружено никаких следов азовоморского стока в южной части Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря за весь период экспедиции.

Необходимо также объяснить причину возникновения черноморского течения в проливе. В нашей работе [31] мы описывали похожие случаи притока черноморских вод в Азовское море после длительного периода интенсивного стока азовоморских вод в Черное море. Данный процесс был идентифицирован на спутниковых снимках, и численная модель также успешно воспроизводила его. Мы объясняем это явление реверсом баротропной составляющей градиента давления, что вызывает компенсационное течение, направленное в обратную сторону (из Черного моря в Азовское море). Подобный процесс уже был описан нашими коллегами, исследовавшими водообмен между лагуной Патос и Атлантическим океаном в Бразилии [30]. Примечательно, что через два дня после окончания экспедиции было обнаружено проникновение черноморских вод в Азовское море на спутниковых снимках (рис. 2в).

Результаты измерений в Керченском проливе позволили сделать еще одно интересное наблюдение. На рис. 6а видно, что область, соответствующая азовоморским водам, занимает весьма значительный объем и располагается по всей глубине Керченского пролива. Причем мы наблюдаем данную ситуацию уже после ослабления северовосточного ветра. Поэтому допустимо предположить, что в период интенсивного стока азовоморские воды занимали еще больший объем в проливе. Тем более, можно заметить, что взаимное расположение областей с разной соленостью на рис. ба весьма характерно в условиях отсутствия влияния сильного ветра и соответствует представлениям о том, как более плотные массы вытесняют азовоморские воды в придонном слое. Если учитывать, что северная часть пролива довольно узкая и неглубокая, то мы можем с большой уверенностью говорить о том, что водообмен в данном случае имел односторонний характер.

Этот вывод подтверждают результаты измерений наших коллег в 2011 г. в северной части Керченского пролива, когда в регионе присутствовал такой же сильный северо-восточный ветер и было зарегистрировано азовоморское течение по всей глубине пролива [13]. С другой стороны, по данным измерений течения в Керченском проливе за период 1981-2006 гг. было определено, что наибольшие расходы воды приходятся именно на односторонние течения [15]. В более ранних работах немаловажную роль в водообмене отводили речному стоку в Азовское море [4, 9, 10]. Однако исследования последних лет говорят о тенденции к снижению объема стока таких крупных рек, как Дон и Кубань [12]. Подобный вывод мы уже делали в предыдущей работе [31], где показали, что в современных условиях речной сток в Азовское море не может оказывать существенного влияния на водообмен на синоптическом и межсезонном масштабах. Поэтому, исходя из данных рассуждений и полученных оценок масштаба азовоморского плюма, мы полагаем, что определяющим фактором в процессе водообмена между Азовским и Черным морями является именно ветер.

Исходя из данного вывода, мы можем сформировать статистику по стоку азовоморских вод в Черное море за последние двадцать лет на основе данных реанализа ветра (табл. 1) и применить но-

Месяц	Длительность стока, часы	Кол-во периодов стока	Суммарная длительность, часы	Вероятность стока, %	Сток, км ³
Январь	70	1.8	124	17	4.8
Февраль	60	2.4	143	20	5.9
Март	55	1.7	95	13	4.1
Апрель	47	1.8	87	12	4.0
Май	42	0.9	40	6	1.9
Июнь	44	0.7	32	4	1.3
Июль	55	0.9	52	7	2.0
Август	55	1.6	88	12	3.2
Сентябрь	67	2.3	153	21	5.4
Октябрь	67	2.8	191	26	7.3
Ноябрь	58	2.2	129	18	5.3
Декабрь	51	2.4	123	17	5.7
За год	672	21.7	1256		50.9

Таблица 1. Статистика по стоку азовоморских вод в Черное море за период 2000-2019 гг.

вый метод для расчета расхода азовоморской воды через Керченский пролив. Из табл. 1 видно, что наибольшая вероятность стока азовоморских вод соответствует осеннему и зимнему периодам, когда наблюдаются наиболее сильные и продолжительные северо-восточные ветра. Летом же, наоборот, ветра утихают, и вероятность стока азовоморских вод достигает своих минимальных значений.

Расчет объема азовоморского стока, представленного в табл. 1, основывается, главным образом, на оценке пространственных характеристик азовоморского плюма в Черном море и, в частности, на определении зависимости его площади от параметров ветра. В предыдущей работе [31] мы получили данную зависимость на основе анализа спутниковых данных:

 $S = -2537.7 + 838.6 \lg(\tau_t t),$

где *S* – искомая площадь азовоморского плюма, κm^2 ; τ_t – напряжение трения ветра, осредненное за период времени *t*, H/m^2 ; *t* – период времени, когда направление ветра соответствует диапазону $10^\circ - 80^\circ$ по азимуту и скорость ветра превышает 5 м/с. Среднеквадратичная ошибка при определении площади азовоморского плюма составляла 163 км².

Для вычисления объема азовоморского стока, помимо площади распространения, необходимо также определить среднюю толщину условного слоя, соответствующего азовоморским водам. По очевидным причинам мы не можем использовать толщину азовоморского плюма, поскольку, попадая в Черное море, азовоморские воды подвергаются интенсивному перемешиванию под воздействием сильного северо-восточного ветра и черноморского течения. Поэтому мы можем ориентироваться только на глубину Керченского пролива, а точнее, его западной части, где располагаются азовоморские воды согласно спутниковым и натурным данным. Но и в данном случае этого недостаточно, поскольку искомая толщина, в условиях распространения азовоморских вод в Черном море, должна быть значительно меньше глубины пролива. Тем не менее, благодаря многолетним измерениям расходов воды в Керченском проливе, существует возможность определить необходимую величину эмпирическим путем.

В монографии [15] указывается диапазон годового расхода азовоморской воды за период 1981– 2006 гг. (34–74 км³/год). При расчете расхода воды новым методом за данный период, полученные значения равномерно распределялись в указанном диапазоне, при значении толщины азовоморского слоя, равном 2.7 метра (рис. 8). Но особенно примечательно, что рассчитанное по новому методу среднее значение годового расхода азовоморской воды (53 км³/год) практически совпадает со средним значением из всех оценок водообмена через Керченский пролив (55 км³/год) [12]. Интересно, что похожий результат мы получили и при расчете среднегодового расхода азовоморской воды за последние двадцать лет (табл. 1).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении следует отметить, что одним из важных результатов проведенной экспедиции является определение соответствия между спутниковыми и натурными данными. Несмотря на то, что численная модель воспроизвела сток азовоморских вод в Черное море, необходимо было убедиться в том, что область, которую мы называем азовоморским плюмом и наблюдаем на спут-



Рис. 8. Сток азовоморских вод через Керченский пролив за период 1981-2019 гг.

никовых снимках, действительно определяет наличие азовоморской воды в Черном море. Причем желательно было убедиться в этом на достаточно большом расстоянии от Керченского пролива, так как азовоморский плюм может быть довольно протяженным и в некоторых случаях достигать южной оконечности Крымского полуострова. Именно данное наблюдение позволило нам оправдать, в должной мере, использование нового метода расчета расхода азовоморской воды. Представленный метод, очевидно, не может претендовать на высокую точность, однако его преимущество заключается в простоте использования, что позволяет приблизительно оценить расход азовоморской воды по данным реанализа ветра за любой период времени.

Полученная зависимость объема поступающей азовоморской воды в Черное море от ветрового воздействия — это простой и эффективный инструмент для численного моделирования поступления азовоморских вод в Черном море. Многие численные модели Черного моря не воспроизводят Азовское море и, как правило, задают сток азовоморских вод как граничное условие на основе среднемесячных или среднесезонных значений. С другой стороны, данный процесс характеризуется значительной синоптической изменчивостью, чем обуславливается существенное преимущество использования предлагаемой в статье параметризации на основе ветрового воздействия по сравнению со среднеклиматическими значениями стока.

Также следует отметить важность отношения объемов эстуария лагунного типа и поступающего в него речного стока, которое определяет относительные роли речного стока и ветра в формировании водообмена. В данной работе мы сделали вывод о том, что ветер является определяющим фактором в процессе водообмена между Азовским и Черным морями. В качестве противоположного примера можно привести водообмен в Амурском лимане [20], где сезонные колебания речного стока оказывают доминирующее влияние. В лагуне Патос, в Бразилии, водообмен с Атлантическим океаном в равной степени зависит от речного стока и ветра [30].

Важно и то, что впервые удалось оценить масштабы азовоморского плюма в условиях сильного северо-восточного ветра. В данном аспекте проведенная экспедиция отличается от более ранних исследований, где основное внимание уделялось измерениям течений в Керченском проливе [13, 15, 19].

К сожалению, нам не удалость привести аналогичных рассуждений и результатов в отношении процесса притока черноморских вод в Азовское море. Продвижение в данном направлении требует дальнейших исследований. Тем не менее, обнаружение факта формирования черноморского течения в Керченском проливе после интенсивного стока азовоморских вод представляется важным аспектом в изучении водообмена между Черным и Азовским морями.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, тема 0149-2019-0003 (анализ натурных исторических данных) и была частично поддержана грантами Российского научного фонда, проект 18-17-00156 (анализ распространения азовоморского плюма) и Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 18-05-80049 (исследование структуры течений в Керченском проливе), 19-55-80004 (разработка спутниковых алгоритмов для определения параметров плюма) и 20-55-75002 (применение реанализов полей ветра для оценок водообмена через пролив), а также грантом РНФ 18-47-06202 (статистики расходов воды в Керченском проливе и речного стока в Азовское море).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Альтман Э.Н.* Метод расчета течений и водообмена в Керченском проливе // Океанология. 1970. Т. Х. Вып. 3. С. 438–447.
- Альтман Э.Н. Исследования водообмена между Черным и Азовским морями // Сб. ЛЮМ ГОИН. 1972. Вып. 11. С. 3–47.
- Альтман Э.Н. Водообмен через Керченский пролив в условиях зарегулированного стока рек Азовоморского бассейна // Океанология. 1973. Т. 13. Вып. 3. С. 416–423.
- Альтман Э.Н. Динамика вод Керченского пролива // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеоиздат, 1991. 324 с.
- Белов В.П., Филиппов Ю.Г. Основные черты динамики вод Азовского моря и Керченского пролива // Тр. ГОИН. 1978. Вып. 139. С. 11–20.
- 6. Белов В.П., Филиппов Ю.Г., Шлыгин И.А. Расчет водообмена через Керченский пролив // Метеорология и гидрология. 1978. № 2. С. 52–59.
- Воронков П.П., Свиташев А.И. Опыт расчета возможной солености Азовского моря в связи с предполагаемыми изменениями его режима // Тр. НИУ ГУГМС СССР. 1941. Сер. V. Вып. 2. С. 28–36.
- Ганькевич В.В. О течениях в Керченском проливе // Тр. II Всесоюзного гидрологического съезда. 1929. Ч. 2. С. 401–403.
- 9. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 853 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. СПб: Гидрометеоиздат, 1991. 236 с.
- Джиганшин Г.Ф., Мотыгин А.С., Морозов А.Н., Шутов С.Ф. Гидрофизическая характеристика Керченского пролива в декабре 2009 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 23. С. 153–158.
- Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. НАН Украины // Морской гидрофизический институт. Севастополь, 2011. 212 с.
- Иванов В.А., Морозов А.Н., Кушнир В.М. и др. Течения в Керченском проливе, АDCP-наблюдения, сентябрь 2011 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26 (1). С. 170–178.
- 14. Иванов В.А., Шапиро Н.Б. Моделирование течений в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. Вып. 10. С. 207–232.
- Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 1. Азовское море. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. 402 с.

- Кан С.И. О расчете и прогнозе течений в Керченском проливе // Тр. Океаногр. Комиссии АН СССР. 1961. Т. 11. С. 130–141.
- Кан С.И., Лагутин Б.Л. Краткосрочный прогноз течений в Керченском проливе // Тр. ЦИП. 1954. Вып. 57. С. 22–34.
- Лагутин Б.Л., Толмазин Д.М. О теоретическом решении проблемы искусственного регулирования водообмена через Керченский пролив // Метеорология и гидрология. 1965. № 4. С. 18–21.
- Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Иванов В.А. и др. Течения в Керченском проливе по данным ADCP-наблюдений 2008–2009 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 22. С. 253–267.
- 20. *Осадчиев А.А.* Распространение плюма реки Амур в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе // Океанология. 2017. Т. 57. № 3. С. 417–42.
- 21. Самойленко В.С. Ближайшее будущее Азовского моря // Тр. ГОИН. 1947. Вып. 6 (16). С. 43–99.
- 22. Соколовский Д.Л. Водный баланс Азовоморского моря // Изв. ГГИ. 1939. № 63. С. 29-43.
- 23. *Толмазин Д.М.* Течения в мелководном проливе переменного сечения // Тр. ГОИН. 1965. Вып. 85. С. 18–23.
- 24. Тучковенко Ю.С. Численная математическая модель циркуляции вод в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. Севастополь, 2002. Вып. 1 (6). С. 223–232.
- 25. Филиппов Ю.Г. Об одном способе расчета морских течений // Тр. ГОИН. 1970. Вып. 103. С. 87–94.
- 26. *Фомин В.В.* Современное моделирование течений и ветрового волнения в Керченском проливе // Морской гидрофизический журн. 2007. № 5. С. 3–13.
- 27. Шехтман А.П. Соленость воды Азовоморского моря при изменении его водного баланса // Метеорология и гидрология. 1958. № 8. С. 14–19.
- 28. Щербак С.С., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Возможности спутникового дистанционного зондирования для изучения влияния атмосферных процессов на формирование течений в Керченском проливе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов / Под. ред. Лаверова Н.П. и др. М.: Азбука-2000, 2007. Вып. 4. Т. 1. С. 376–383.
- Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Goryachkin Y.N., Stanichny S.V. Propagation of waters from the Kerch Strait in the Black Sea // Phys. Oceanogr. 2017. V. 6. P. 47–57.
- Castelao R.M., Moller Jr., O.O. A modeling study of Patos lagoon (Brazil) flow response to idealized wind and river discharge: dynamical analysis // Braz. J. Oceanogr. 2006. V. 54. P. 1–17.
- Zavialov I B., Osadchiev A.A., Sedakov R.O. et al. Water exchange between the Sea of Azov and the Black Sea. through the Kerch Strait // Ocean Sci. 2020. V. 16. P. 15–30.

Research of Water Exchange in the Kerch Strait on Historical Data and Contact Measurement Data

I. B. Zavialov^{*a*, #}, A. A. Osadchiev^{*a*}, P. O. Zavialov^{*a*}, V. V. Krementskiy^{*a*}, I. V. Goncharenko^{*a*}

^aShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]e-mail: i.zav@ocean.ru

This work presents the results of a study of the water exchange process between the Sea of Azov and the Black Sea based on data from contact measurements in 2019. Estimates of the scale of the Azov Sea plume were obtained under conditions of a strong northeast wind. The measurement results also confirmed the decisive role of wind in the process of water exchange, which made it possible to obtain statistics on the runoff of the Azov Sea waters to the Black Sea based on wind reanalysis data over the past twenty years. As a result of determining the correspondence between satellite and field data, a new method for calculating the flow of Azov Sea water through the Kerch Strait was described and applied. The calculation of the Azov Sea water discharge is mainly based on the assessment of the spatial characteristics of the Azov Sea plume in the Black Sea and, in particular, on the determination of the dependence of its area on the wind parameters. The average value of the annual discharge of the Sea of Azov calculated by the new method practically coincides with the average value from all estimates of water exchange through the Kerch Strait, obtained using other calculation methods. Also, a special case of the inflow of the Black Sea waters into the Sea waters into the Black Sea waters into the Black Sea waters into the Sea waters into the Black Sea waters into the Black Sea waters into the Black Sea waters into the Sea of Azov after the end of the period of intensive flow of the Azov Sea waters into the Black Sea waters into the B

Keywords: water exchange, Kerch Strait, Sea of Azov, Black Sea