

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕЧНЫХ ВОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЕЯ

На основе всей имеющейся гидрологической информации исследуется сезонная и межгодовая изменчивость процесса распространения трансформированных речных вод на шельфе северо-западной части Черного моря (СЗЧМ). Анализ сезонных изменений площадей разных зон трансформации поверхностных вод, речного стока и ветра над морем доказывает, что главную роль в летнем продвижении трансформированной воды (соленость 14-17‰) в центральные и восточные районы СЗЧМ играют особенности ветрового режима, определяющие характер морских течений в летний сезон, после поступления в море максимального стока из устьевых областей крупных рек. Выявлены многолетние отрицательные тренды солёности поверхностных вод в центральной части СЗЧМ (июль) и придунайском районе (август), соответствующие тенденциям усиления северной и западной составляющих ветра во второй половине XX века. Продемонстрирована различная реакция солёности в отдельных районах шельфа на межгодовые колебания речного стока из основных источников – Дуная и Днестра с Южным Бугом.

Введение

Пресная вода, поступающая в Черное море с речным стоком и распространяющаяся на шельф и в глубоководные районы, является важным фактором формирования и изменчивости структуры, динамики и экологического состояния морских вод. Монография [1] обобщает данные наблюдений и знания по этой теме, полученные к концу 60-х годов XX века. После этого накоплено намного больше гидрологической информации, чем до 1970 г., и исследования по данной проблеме актуальны [2-6] прежде всего в связи с климатическими изменениями последних десятилетий.

Цель данной работы – на основе всех доступных данных наблюдений получить достоверные характеристики сезонной и межгодовой изменчивости процесса распространения речных вод на

шельфе северо-западной части Черного моря (СЗЧМ). Основным индикатором при этом служит соленость воды на поверхности моря, а в качестве внешних воздействий рассматриваются сток крупных рек (Дуная и Днестра с Южным Бугом) и ветровой режим над морем.

Характеристика использованных материалов

Работа выполнена на основе информационной базы и ГИС, созданных в Морском отделении УкрНИГМИ. Используются практически все многолетние данные стандартных и специализированных экспедиционных наблюдений, выполненных на судах различных ведомств бывшего СССР в XX веке, а также информация морских и устьевых станций гидрометслужбы Украины. При выборке гидрологических данных для описания межгодовой изменчивости использовалось разбиение северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) на 40-мильные и 20-мильные «квадраты» (рис. 1). Нумерация 20-мильных квадратов составная, например, квадрат, примыкающий к устью Днепро-Бугского лимана, имеет номер 1-2.

На рис. 2 показано распределение гидрологических станций по акватории СЗЧМ до и после публикации [1], а также распределение числа станций по годам. Если для периода 1923-1970 гг. в базе данных имеется 1894 станции, выполненных в ходе 407 съемок, то в 1970-2001 гг. число съемок составило 1025, а станций - 29221. Всего для района СЗЧМ в базе данных содержится 1432 съемки и 40115 станций.

Сезонная и межгодовая изменчивость скорости ветра над морем исследовалась на основе среднемесячных данных ре-анализа

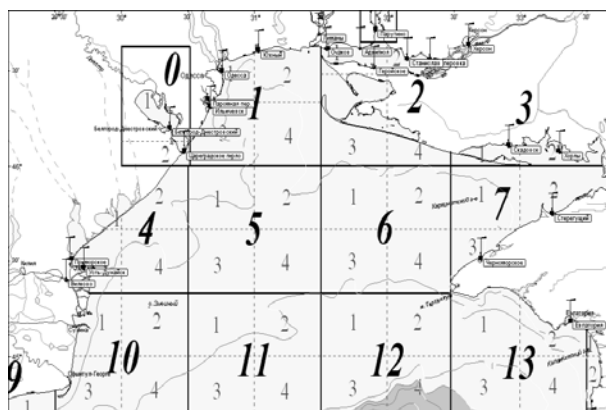


Рис. 1. Положение и нумерация «квадратов» со сторонами 40 и 20 миль в СЗЧМ

NCER/NCAR для узла 2-градусной сетки с координатами $44,761^{\circ}$ с. ш.; $30,0^{\circ}$ в. д. [7]. Отметим, что в данных ре-анализа U-компонента имеет положительное направление на восток, V-компонента – на север. При этом результирующий вектор направлен «из компаса», как при измерениях направления морских течений, а не «в компас», как принято в метеорологии.

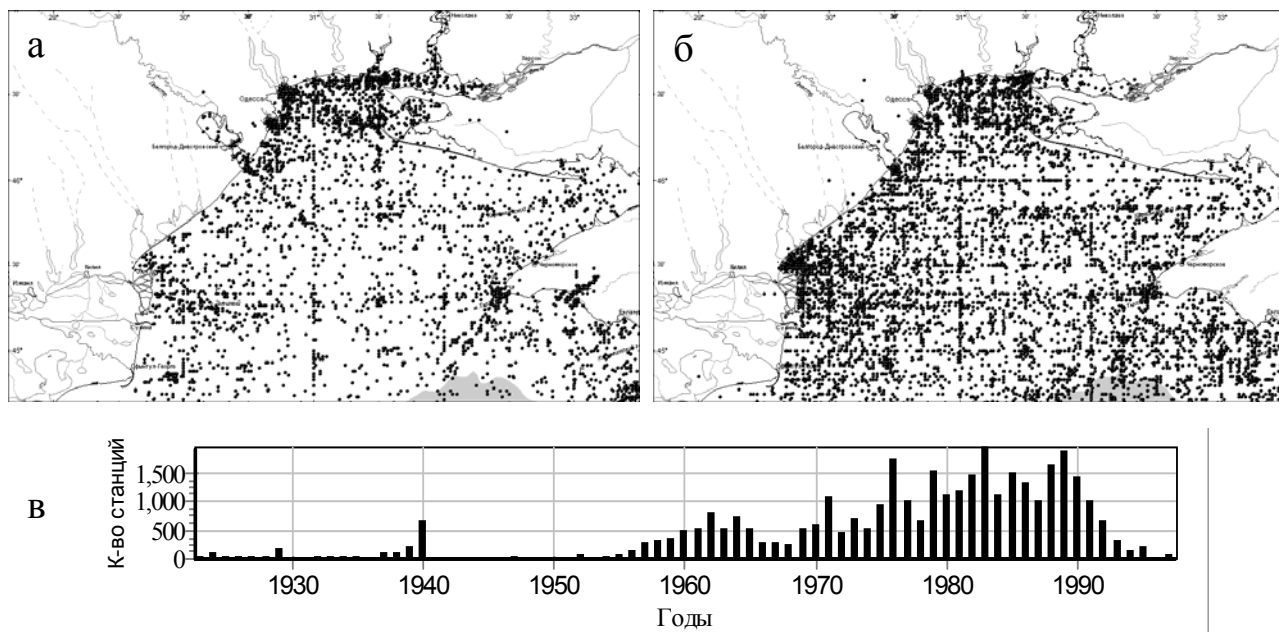


Рис. 2. Распределение гидрологических станций в СЗЧМ по пространству (а, б) и годам (в): а – до 1970 г.; б – 1970-2001 гг.

Сезонные аспекты распространения речных вод

По всей совокупности данных судовых гидрологических наблюдений построены ежемесячные среднемноголетние карты поверхностной солёности западной части Чёрного моря, которые отображают сезонный ход трансформации и распространения речных вод вдоль западных берегов моря, а также по нормали от устьевых взморий до края шельфа СЗЧМ и Крымского полуострова.

На рис. 3 представлены карты солёности для весенне-летнего сезона, когда наблюдается наибольшее продвижение распресненных вод (помеченных оттенками серого) к востоку и юго-востоку. Для всех месяцев года вычислены площади поверхности, занимаемые водами с солёностью, не превышающей 14, 16 и 17‰ в районе СЗЧМ, ограниченном прямоугольником на рис. 3в. Эти величины солёности установлены в ходе предшествующего анализа гидрологических данных [4, 5]. Изохалина 14‰ ограничивает зоны первичной (0-10‰) и вторичной (10-14‰) трансформации, находящиеся под непосредственным влиянием речного стока, а поверхностные воды с солёностью 14-17‰ составляют зону полной трансформации, в большей степени подверженную воздействию горизонтальной адвекции и турбулентной диффузии на морском шельфе.

Анализ сезонных изменений площадей различных зон трансформации (распреснения) поверхностных вод, объема речного стока и ветра над морем доказывает, что основную роль в продвижении трансформированной воды с соленостью 14-17‰ в центральные и восточные районы СЗЧМ играют особенности ветрового режима, обуславливающие перестройку поля ветровых течений в летний сезон после поступления в море максимального стока из Дунайской, Днестровской и Днестро-Бугской устьевых областей.

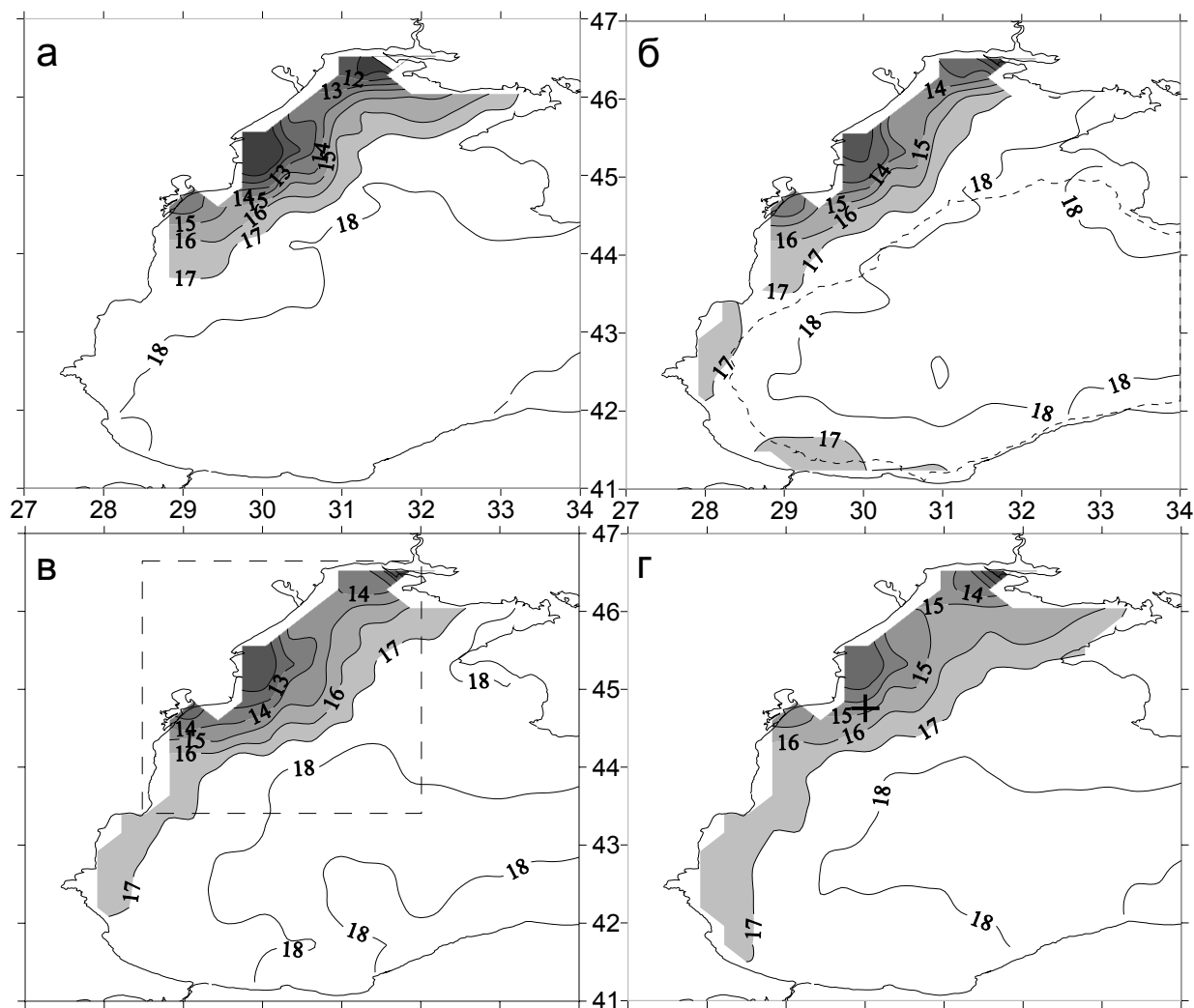


Рис. 3. Среднегоголетняя соленость морской воды (‰) на поверхности западной части Черного моря в апреле (а), мае (б), июне (в) и июле (г). Указаны: граница шельфа – изобата 100 м (б); район вычисления площадей распресненных вод (в); узел сетки ре-анализа (крестик), в котором взяты данные о ветре над морем (г)

Из рис. 4 видно, что весенний максимум стока рек наступает в мае в то время как площади распреснения, возросшие в марте и апреле, имеют

локальный минимум в мае, после чего опять растут в июне и июле, когда сток рек заметно снижается. Такое поведение кривых распределения можно объяснить только с помощью графиков сезонного хода компонент ветра над морем (рис. 4в).

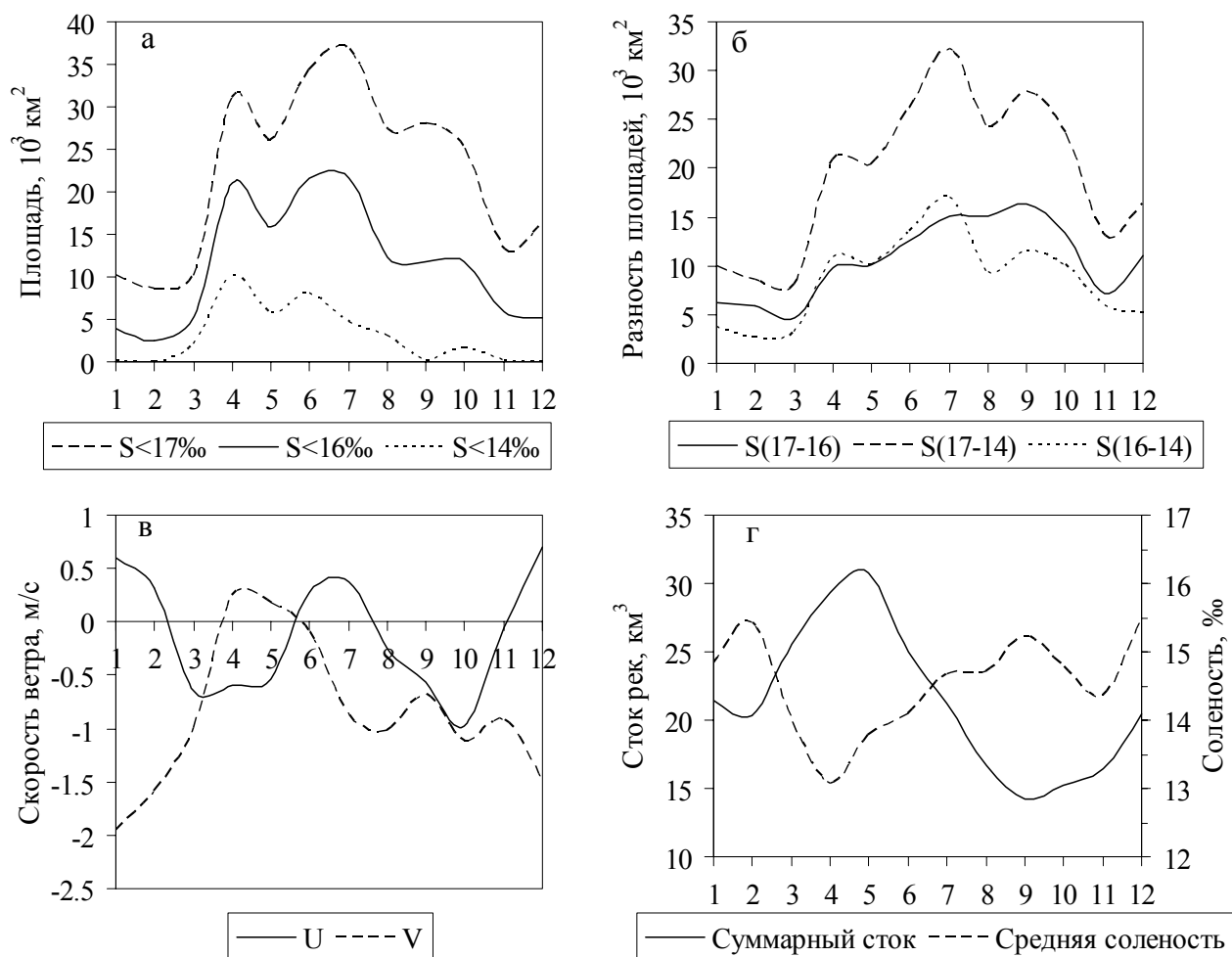


Рис. 4. Сезонный ход площадей распределения (а) и их разности (б), компонент среднего ветра в придунайском районе (в), суммарного стока рек и средней солёности поверхностных распределенных вод (г)

В марте-мае происходит смена направления ветра с зимнего северо-западного (дует на юго-восток) на юго-восточное (дует на северо-запад), т.е. распределенные воды прижимаются к побережью и площади зон трансформации уменьшаются, несмотря на увеличение объема речного стока. В июне-июле вновь усиливаются ветры западных румбов (преимущественно северо-западный), поэтому распределенные воды переносятся к востоку, юго-востоку, и площадь распределения растет даже при существенном снижении объема пресной воды, поступающей из рек.

Таким образом, подтверждается ведущая роль сезонных изменений ветра в процессе летнего продвижения зон распределения к востоку, юго-востоку, причем не только зональной компоненты ветра, как утверждается в [4], но и меридиональной, как следует из рис. 4.

Межгодовая изменчивость летнего распределения

Исследование межгодовой изменчивости летнего поля поверхностной солености выполнено посредством формирования временных рядов в отдельных квадратах СЗЧМ (рис. 1) с наибольшим количеством данных гидрологических наблюдений. При таком подходе возникает проблема разделения временных и пространственных вариаций поля, особенно в приустьевых районах, где соленость наиболее изменчива. Недостаточное для вычисления среднемесячных величин солености число данных наблюдений, попадающих в каждом году в «характерные» 20-мильные квадраты 1-4, 10-2, 5-4, 6-4 заставляет расширить пространственные рамки осреднения данных до соответствующих 40-мильных квадратов и тем самым усилить неопределенность смешанной пространственно-временной изменчивости.

Ряды многолетних значений солености формировались для каждого месяца с мая по август. Сформировано 4 группы рядов: 1 – северный район СЗЧМ, находящийся под влиянием стока из Днепро-Бугской устьевой области (кв. 1); 2 – придунайский район (кв. 10); 3 – центральная часть северо-западного шельфа (кв. 5); 4 – восточная часть СЗ шельфа, к западу от Каркинитского залива (кв. 6). Данные наблюдений предварительно прошли фильтрацию: отбраковывались значения солености, выходящие за пределы двойного среднеквадратического отклонения. Такая процедура позволила отсеять не только заведомо ошибочные наблюдения, но и отдельные случаи проникновения низкосолёных вод в зоны вторичной и полной трансформации. Затем наблюдения осреднялись при условии, что количество значений солености было не менее 5 в приустьевых квадратах 1 и 10, и не менее 3 в центральных квадратах 5 и 6.

В первую очередь полученные ряды исследовались на наличие многолетних линейных трендов. На рис. 5 представлены значимые на уровне вероятности 95% отрицательные тренды солености, обнаруженные в центре СЗ шельфа (квадрат 5) в июле (наклон – $0,04\text{‰ год}^{-1}$) и в придунайском районе (квадрат 10) в августе (наклон – $0,056\text{‰}$

год⁻¹). Данные для этих районов охватывают (с пропусками) интервал 1957–1995 гг. Значимых трендов стока рек в весенне-летний период (апрель-август) выявлено не было, однако ряды среднегодовых и среднемесячных для июня-августа компонент скорости ветра над морем демонстрируют отчетливые линейные тренды на том же интервале лет (табл. 1). В таблице выделены тренды, значимые с вероятностью не менее 95%.

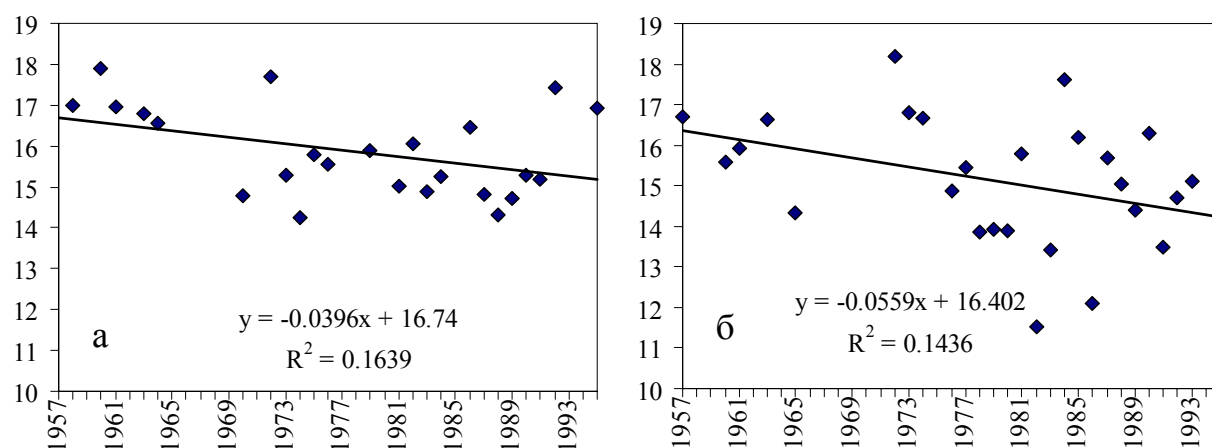


Рис. 5. Межгодовая изменчивость солёности на поверхности северо-западной части Черного моря: а – кв. 5, июль; б – кв. 10, август

Таблица 1

Коэффициенты наклона (мс⁻¹год⁻¹) линейных трендов компонент скорости ветра над морем в 1957-1995 гг. по данным ре-анализа NCEP/NCAR

Компонента	Июнь	Июль	Август	Среднегодовые
U (+ на восток)	0,04	0,01	0,01	0,03
V (+ на север)	-0,02	-0,05	-0,04	-0,03

Положительный тренд зональной компоненты означает усиление ветра от западных направлений, а отрицательный тренд меридиональной компоненты – усиление ветра от северных направлений. Как в среднем за год, так и в летние месяцы наблюдается усиление северо-западного ветра, способствующего переносу воды в общем направлении к югу, юго-востоку. Это означает, что июльский тренд солёности в квадрате 5 и августовский в квадрате 10 может быть вызван усилением влияния трансформированных вод днепро-бугского происхождения, переносимых в придунайский и центральный районы СЗЧМ ветровыми течениями и

достигающих указанных районов со сдвигом соответственно 2 и 3 месяца от времени максимума весеннего половодья (май).

Несмотря на отсутствие значимых долгосрочных тенденций, сток рек испытывает существенные межгодовые колебания с периодами от 2 до 7 лет, которые не могут не влиять на изменения солёности верхнего слоя вод в приустьевых и открытых районах СЗЧМ. Из-за особенностей поля ветровых течений солёность в каждом из исследуемых квадратов по-разному реагирует на влияние различных источников, прежде всего - Дуная и Днестра с Южным Бугом. В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции среднемесячных значений солёности для периода максимального распреснения в квадратах СЗЧМ и расхода этих рек за те же и предыдущие месяцы (выделены коэффициенты не менее 0,4).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции солёности воды на поверхности районов СЗЧМ в июле и августе со среднемесячными расходами основных рек

Квадрат	Месяц	Дунай				Днепр + Юж. Буг			
		май	июнь	июль	август	май	июнь	июль	август
1	июль	-0,53	-0,58	-0,46		-0,55	-0,79	-0,36	
	август	-0,39	-0,35	-0,30	-0,17	-0,41	-0,64	-0,45	-0,46
10	июль	-0,39	-0,40	-0,34		-0,17	-0,42	0,18	
	август	-0,15	-0,17	-0,28	-0,14	-0,49	-0,38	-0,18	-0,14
5	июль	-0,17	-0,29	-0,27		-0,12	-0,22	-0,38	
	август	-0,27	-0,23	-0,09	0,05	-0,15	-0,28	-0,26	-0,22
6	июль	0,09	-0,10	0,06		-0,27	-0,16	-0,01	
	август	-0,22	-0,15	-0,07	-0,15	-0,17	-0,34	-0,41	-0,43

Максимальные корреляции наблюдаются у июльской солёности северного района, примыкающего к Днепро-Бугскому лиману (кв. 1), со стоком Днестра и Южного Буга в июне, хотя августовская солёность значительно реагирует на сток соседних рек во все месяцы, что не удивительно. Вызывает удивление реакция июльской солёности в этом квадрате на сток Дуная, что может объясняться высокой корреляцией с апреля по июль между стоком всех рек региона. В свою очередь, придунайский район (кв. 10) в июле реагирует лишь на июньский сток как Дунайский, так и Днепро-Бугский, что также связано с высокой корреляцией между этими реками. Кроме того, квадрат 10 в августе

реагирует на Днепро-Бугский сток в мае, что подтверждает вывод, сделанный выше при анализе рис. 5б. Слабая коррелированность солености придунайского района со стоком Дуная может быть следствием природных процессов (наличие гидрофронта, перенос речных вод в основном к югу после их выхода на взморье, поступление соленых морских вод нижних слоев при сгонах и т.п.), определяющих высокую пространственную изменчивость солености в кв. 10 [6]. С этим связан и высокий межгодовой разброс средних значений на рис. 5б.

Удаленный от приустьевых областей квадрат 6 демонстрирует заметную корреляцию августовской солености с Днепро-Бугским стоком за этот и предыдущий месяц, что свидетельствует о систематическом распространении на этот район к концу лета языка распресненных вод с северо-запада.

Выводы

1. Анализ всех доступных данных наблюдений позволил уточнить сезонные особенности распространения трансформированных речных вод на шельфе СЗЧМ и в первом приближении оценить его многолетнюю изменчивость.

2. Получено подтверждение преимущественной роли ветра и вызванных им течений в процессе весенне-летнего продвижения распресненных вод к востоку и юго-востоку от приустьевых зон крупных рек СЗЧМ.

3. Выявлены многолетние отрицательные тренды солености поверхностных вод в центральной части СЗЧМ (июль) и придунайском районе (август), соответствующие тенденциям усиления северной и западной составляющих ветра во второй половине XX века.

4. С помощью взаимного корреляционного анализа продемонстрирована различная реакция солености в отдельных районах шельфа на межгодовые колебания речного стока из основных источников – Дуная и Днестра с Южным Бугом.

* *

На основі усієї наявної гідрологічної інформації досліджено сезонну й міжрічну мінливість процесу поширення трансформованих річкових вод на шельфі північно-західної частини Чорного моря (ПЗЧМ). Аналіз сезонних змін площ різних зон трансформації поверхневих вод, річкового стоку і вітру над морем доводить, що головну роль у просуванні трансформованої

води (солоність 14-17‰) у центральні і східні райони ПЗЧМ відіграють особливості вітрового режиму, що зумовлюють характер морських течій у літній сезон, після надходження у море максимального стоку з гирлових областей великих річок. Виявлено багаторічні негативні тренди солоності поверхневих морських вод у центральній частині ПЗЧМ (липень) й у придунайському районі (серпень), що відповідають тенденціям посилення північної й західної складових вітру над регіоном у другій половині ХХ сторіччя. Продемонстровано різну реакцію солоності в окремих районах шельфу на міжрічні коливання річкового стоку з головних джерел: Дунаю й Дніпра з Південним Бугом.

* *

1. *Большаков В.С.* Трансформация речных вод в Черном море. – К.: Наук. думка, 1970. – 328 с.
2. *Блатов А.С., Булгаков Н.П., Иванов В.А., Косарев А.Н., Тужилкин В.С.* Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 240 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV: Черное море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / Под ред. *Симонова А.И., Альтмана Э.Н.* – С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1991. – 430 с.
4. *Иванов В.А., Ильин Ю.П.* Атмосферные и гидрологические условия, способствующие распространению речных вод в северо-западной части Черного моря // Комплексные экологические исследования Черного моря. - Севастополь: МГИ НАН Украины, 1995. – С. 68-81.
5. *Ильин Ю.П.* Распространение речных вод // Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный: современное состояние экосистемы / Под ред. *Иванова В.А., Гошовского С.В.* - Севастополь: МГИ НАНУ, 1999. – С. 59-73.
6. *Ильин Ю.П.* Гидрологическая структура вод при различных ветровых ситуациях по данным полигонных и спутниковых наблюдений // Природные условия взморья реки Дунай и острова Змеиный: современное состояние экосистемы / Под ред. *Иванова В.А., Гошовского С.В.* - Севастополь: МГИ НАНУ, 1999. – С. 134-146.
7. NCEP-NCAR Reanalysis Monthly Means. – <http://www.cdc.noaa.gov/>.

Морское отделение Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института, Севастополь