

**Многолетние и сезонные изменения характеристик
постоянного галоклина в восточной половине
Черного моря**

© 2015 Б.Н. Панов, Е.О. Спиридонова

*Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Россия
E-mail: panov_bn@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.03.2014 г. После доработки 12.05.2014 г.

Рассмотрены особенности многолетних и сезонных изменений характеристик трех типов состояния постоянного галоклина, соответствующих зонам подъема и опускания вод в восточной половине Черного моря в период с 1955 по 1994 гг. Использование предложенных показателей позволило установить, что в многолетних изменениях глубины залегания и интенсивности галоклина наиболее значимыми являются процессы, происходящие в глубоких антициклонических вихрях, а для межгодовой и сезонной изменчивости – в малых антициклонических вихрях. Основным свойством рассмотренных процессов было преобладание синхронности в изменениях градиентов солености и глубин положения галоклина в различных динамических образованиях. Компенсационная асинхронность вертикальных движений галоклина в зонах подъема и опускания вод проявлялась только при уменьшении временных масштабов усреднения данных до сезонных значений, а пространственных – до размеров 2° ш. \times 4° д.

Ключевые слова: Черное море, постоянный галоклин, синоптические вихри, сезонная и межгодовая изменчивость.

Введение. Активизация полигонных гидрофизических исследований в Черном море в 80-е годы прошедшего столетия позволила значительно расширить круг наших представлений об особенностях пространственно-временной изменчивости циркуляции вод моря. В результате этих исследований было установлено, что в циркуляции вод Черного моря преобладает режим среднemasштабной синоптической нестационарности, который может проявляться и в многолетней изменчивости [1, 2].

Главной причиной синоптической изменчивости термохалинных полей являются вихревые образования и меандры Основного Черноморского течения (ОЧТ), максимум плотности доступной потенциальной энергии которых находится в слое постоянного галоклина [3]. Поэтому очевидно, что характеристики галоклина могут быть использованы как показатели пространственно-временной изменчивости циркуляции вод.

В последние годы, благодаря совершенствованию дистанционных и дрейферных методов океанографического мониторинга, значительно углубились знания о циркуляции верхнего слоя вод Черного моря. Современные модели циркуляции с высоким пространственным разрешением позволяют исследовать изменчивость вихревой структуры течений на различных глубинах.

Однако существующие представления о разнонаправленных процессах и многолетних тенденциях в изменчивости гидрофизических полей верхнего

слоя вод и слоя основного пикноклина [4 – 8], а также противоречия, отмеченные при обсуждении причин вертикальных движений черноморского пикноклина [9] и сезонного хода интенсивности циркуляции вод [10], позволяют по-прежнему считать актуальными исследования структуры пикноклина.

Цель данной работы – изучение особенностей пространственно-временных изменений характеристик галоклина, используемых в качестве показателей циркуляции вод.

Материалы и методы исследования. В работе [11] было показано, что идентифицировать динамические образования в геострофической циркуляции черноморских вод можно, используя одновременно глубину положения постоянного галоклина (H) и величину максимального градиента солености в нем (I), сочетая высокие (H_B, I_B) и низкие (H_H, I_H) значения этих показателей, а именно:

– H_B, I_B — глубокое положение обостренного галоклина (тип галоклина ВВ), соответствует зонам малых антициклонических вихрей (далее МАЦВ) и слабых прибрежных опусканий вод;

– H_H, I_B — высокое положение обостренного галоклина (тип галоклина НВ), соответствует зонам циклонических вихрей (ЦВ) и прибрежных апвеллингов;

– H_B, I_H — глубокое положение размытого галоклина (тип галоклина ВН), соответствует зонам глубоких антициклонических вихрей (ГАЦВ) и прибрежных опусканий вод на периферии ОЧТ.

Высокие и низкие показатели определялись по данным каждой океанографической съемки по формулам:

$$H_B > H_{cp} + \sigma H, \quad I_B > I_{cp} + \sigma I;$$

$$H_H < H_{cp} - \sigma H, \quad I_H < I_{cp} - \sigma I,$$

где σH и σI – средние квадратические отклонения значений H и I .

Характеристики галоклина были рассчитаны по материалам порейсового массива океанографических станций (всего 24479), выполненных в 416 экспедициях Южного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (ЮгНИРО), Морского гидрофизического института (МГИ) и Украинского научного центра экологии моря (УкрНЦЭМ) с 1954 по 1996 гг. в восточной половине Черного моря (к востоку от 35° в. д.).

В результате произведенной выборки были сформированы три массива станций (всего 7273), данные которых охватывают период с 1955 по 1994 гг. и характеризуют соответственно три типа галоклина в зонах МАЦВ, ЦВ и ГАЦВ в восточной половине моря, а также соответствующие массивы для северо-восточного и юго-восточного подрайонов (рис. 1), различающихся особенностями циркуляции вод.

Методика определения характеристик выделенных типов постоянного черноморского галоклина и формирования рядов их средних годовых значений изложена в работе [12].

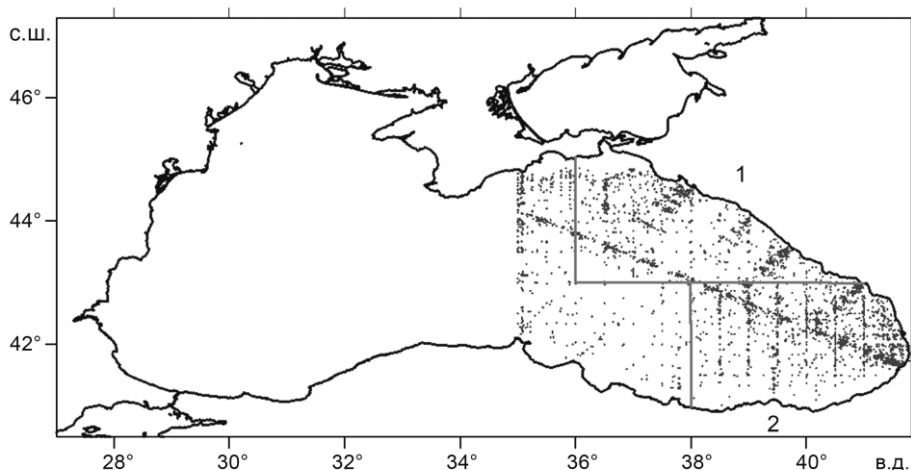


Рис. 1. Расположение океанографических станций (всего 7273), выполненных в 1955 – 1994 гг., данные которых характеризуют три рассмотренных типа постоянного галоклина в восточной половине Черного моря (1 и 2 – северо-восточный и юго-восточный подрайоны соответственно)

Использованная база данных позволила исследовать также особенности сезонных изменений характеристик выделенных типов галоклина во всей восточной половине моря за 20 лет в интервале с 1959 по 1992 г., в северо-восточном подрайоне – для 1969, 1971, 1981, 1982 и 1988 гг., в юго-восточном подрайоне – для 1983 – 1989 гг.

Сезонные данные использовались в анализе, если каждый тип галоклина в сезоне характеризовался материалами трех или более глубоководных станций.

Взаимосвязь изменений характеристик рассматриваемых типов галоклина определялась коэффициентом корреляции. Статистически достоверными принимались связи с уровнем значимости $\geq 0,95$.

Результаты исследований. Сведения о межгодовых изменениях и многолетних тенденциях в изменчивости средних годовых величин градиента солености и глубины положения галоклина можно получить из графиков, представленных на рис. 2.

Для зон МАЦВ можно отметить рост глубины положения галоклина (в интервале 100 – 130 м) до середины 70-х годов (более интенсивный в юго-восточном подрайоне), затем ее уменьшение (более интенсивное в северо-восточном подрайоне). Величина максимального градиента солености в этих зонах с середины 70-х годов до середины 80-х возрастает (более интенсивно в северо-восточном подрайоне) в интервале 0,035 – 0,055 ‰/м, затем (к середине 90-х) уменьшается.

Для зон ГАЦВ наблюдается устойчивая для обоих подрайонов тенденция уменьшения глубины залегания галоклина в пределах 100 – 140 м с начала 70-х годов и до конца исследуемого периода. Отличительной чертой изменений максимального градиента солености в этом типе галоклина является пороговый характер. До начала 80-х годов относительная стабильность значе-

ний сохранялась в пределах 0,023 – 0,027 ‰/м, в начале 80-х произошел резкий (в течение 3 – 4 лет) рост градиента, затем отмечалась его стабилизация на уровне 0,032 – 0,034 ‰/м.

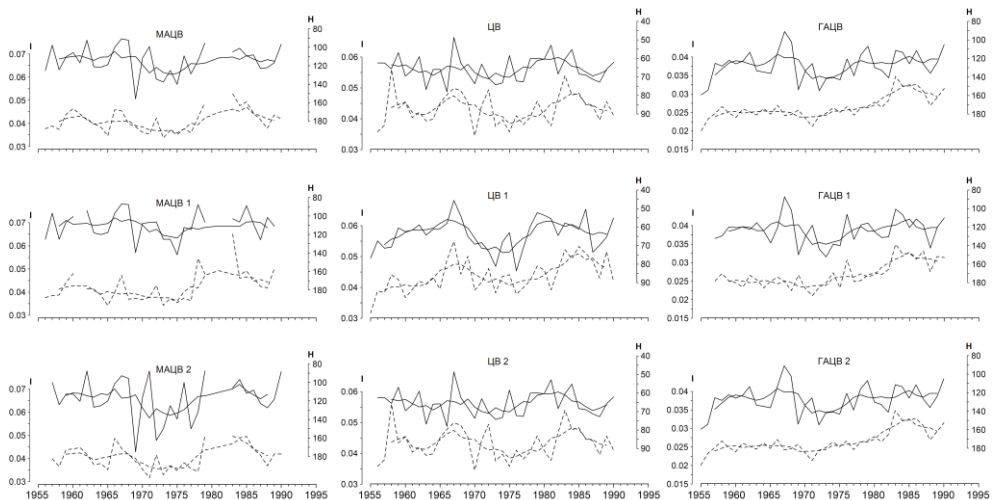


Рис. 2. Многолетние изменения средних годовых значений (сглаженных 5-летним скользящим усреднением) максимального градиента солёности I (‰/м) и глубины его положения H (м) в постоянном галоклине в восточной половине Черного моря для зон МАЦВ, ЦВ и ГАЦВ (I и 2 – северо-восточный и юго-восточный подрайоны соответственно; H – сплошные кривые, I – штриховые кривые)

Для характеристик галоклина в зонах ЦВ следует отметить более четко выраженные колебательные процессы среднегодовых значений (2 – 3 цикла за исследуемый период), не совпадающие по фазе. Изменения глубины положения галоклина происходят преимущественно в пределах от 45 до 75 м, градиента солёности – от 0,035 до 0,050 ‰/м. Особенно интенсивно происходили рост градиента и уменьшение глубины положения галоклина в зонах подъема вод обоих подрайонов с середины 70-х до середины 80-х годов. Эти особенности можно интерпретировать как усиление циклонической завихренности течений в период общей активизации циркуляции вод в восточной половине Черного моря.

В происходивших изменениях исследуемых показателей присутствуют как общие тенденции, так и характерные для каждого типа галоклина особенности.

Корреляционная оценка взаимосвязи изменений средних годовых характеристик I и H , происходящих в различных типах галоклина (табл. 1), указывает прежде всего на синхронность этих изменений (связи II и HH). В большей степени синхронность свойственна характеристикам галоклина северо-восточного подрайона. Менее устойчива асинхронность связей IH , что может указывать на различную природу факторов, регулирующих многолетние изменения I и H . В юго-восточном подрайоне значимая асинхронная связь IH существует только в зонах ГАЦВ.

По всей восточной половине моря и в юго-восточном подрайоне изменения, происходящие в галоклине ГАЦВ, можно считать более показательными, так как их связь с изменениями в других зонах характеризуется более высокими коэффициентами корреляции. Причем в случае увеличения размеров пространственного усреднения данных от подрайона до половины моря коэффициенты корреляции возрастали. Степень взаимосвязи ($|k_{cp}|$) характеристик рассматриваемых типов галоклина представлена в следующей схеме.

Восточная половина моря	Северо-восточный подрайон	Юго-восточный подрайон
МАЦВ 0,43 ЦВ	МАЦВ 0,44 ЦВ	МАЦВ 0,23 ЦВ
0,49 0,61	0,44 0,43	0,44 0,30
ГАЦВ	ГАЦВ	ГАЦВ

Таблица 1. Коэффициенты корреляции k статистически достоверных взаимосвязей изменений средних годовых значений характеристик исследуемых типов постоянного галоклина в восточной половине Черного моря

Тип галоклина	Характеристика	Восточная половина моря						Северо-восточный подрайон						Юго-восточный подрайон					
		МАЦВ		ЦВ		ГАЦВ		МАЦВ		ЦВ		ГАЦВ		МАЦВ		ЦВ		ГАЦВ	
		<i>I</i>	<i>Н</i>	<i>I</i>	<i>Н</i>	<i>I</i>	<i>Н</i>	<i>I</i>	<i>Н</i>	<i>I</i>	<i>Н</i>	<i>I</i>	<i>Н</i>	<i>I</i>	<i>Н</i>	<i>I</i>	<i>Н</i>	<i>I</i>	<i>Н</i>
МАЦВ	<i>I</i>		-0,39	0,63	-0,31	0,68	-0,45		-0,43	0,60	-0,46	0,60	-0,51		-	0,51	-	0,61	-0,31
	<i>Н</i>			-0,28	0,50	-	0,84			-0,28	0,40	-	0,64			-	0,41	-	0,82
ЦВ	<i>I</i>				-0,59	0,68	-0,59				-0,66	0,56	-0,51				-	0,42	-0,38
	<i>Н</i>					-0,44	0,73				-	0,66						-	0,40
ГАЦВ	<i>I</i>						-0,54						-0,49						-0,50
	<i>Н</i>																		

Примечание. Уровень реализации возможных связей – 78% (в 35 случаях из 45 возможных). Жирным шрифтом показаны значения коэффициента корреляции синхронных связей *II* и *НН*.

В межгодовых изменениях (после исключения линейного тренда) уровень реализации возможных связей исследуемых характеристик снизился с 78 до 53% за счет уменьшения числа асинхронных связей *ИН* для всей восточной половины моря. Уменьшились и коэффициенты корреляции. При уменьшении масштабов усреднения данных до уровня подрайонов отмеченные связи в основном сохранялись. Более устойчивыми остались синхронные связи *II* и *НН*. По всей восточной половине моря и в северо-восточном подрайоне наиболее показательными становятся изменения, происходящие в галоклине зон МАЦВ. В юго-восточном подрайоне сохранилась ключевая роль изменений, происходящих в галоклине зон ГАЦВ.

При исследовании изменений средних годовых значений характеристик галоклина не проявился принцип компенсации подъема галоклина в зонах циклонических вихрей его опусканием в зонах антициклонических вихрей.

То есть процессы рассмотренных пространственно-временных масштабов не отражают пространственных изменений характеристик галоклина, вызванных вихревой структурой черноморских течений.

Взаимосвязь средних сезонных значений характеристик I и H представлена в табл. 2. Исключение линейного тренда из рядов этих значений фактически не повлияло на степень их взаимосвязи. При усреднении показателей по всей восточной половине моря, как и в изменениях средних годовых значений (табл. 1), реализуются практически все возможные синхронные связи типа II и HH . Наиболее показательными становятся изменения, происходящие в галоклине МАЦВ.

На нижеследующей схеме показана степень взаимосвязи ($|k_{cp}|$) характеристик рассматриваемых типов галоклина.

До исключения тренда МАЦВ 0,28 ЦВ 0,35 0,25 ГАЦВ	После исключения тренда МАЦВ 0,26 ЦВ 0,47 0,17 ГАЦВ
-----------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------

Таблица 2. Коэффициенты корреляции k статистически достоверных взаимосвязей изменений средних сезонных значений характеристик исследуемых типов постоянного галоклина в восточной половине Черного моря (до и после исключения линейного тренда)

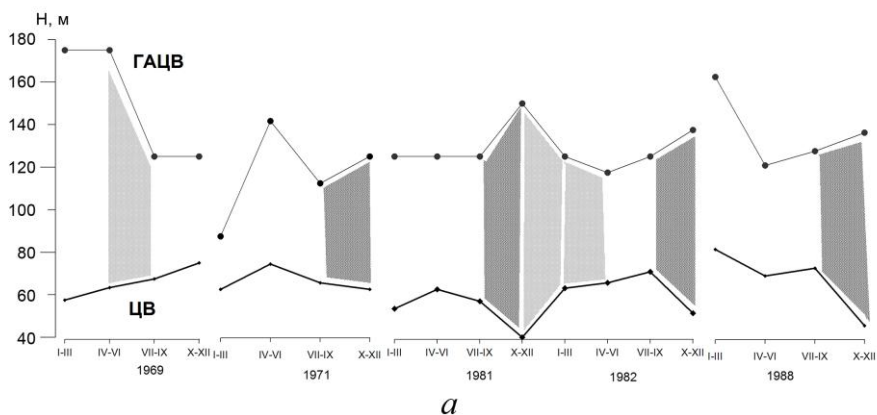
Тип галоклина	Характеристика	До исключения тренда						После исключения тренда					
		МАЦВ		ЦВ		ГАЦВ		МАЦВ		ЦВ		ГАЦВ	
		I	H	I	H	I	H	I	H	I	H	I	H
МАЦВ	I		-0,24	0,55	-0,26	0,58	–		-0,26	0,51	–	0,53	-0,28
	H			–	0,30	–	0,82			-0,24	0,30	-0,26	0,81
ЦВ	I				-0,30	0,30	-0,27				-0,34	–	-0,26
	H					–	0,42					–	0,43
ГАЦВ	I						–						–
	H												

Примечание. До исключения тренда уровень реализации возможных связей – 67% (в 10 случаях из 15 возможных). После исключения тренда уровень реализации возможных связей – 73% (в 11 случаях из 15 возможных). Жирным шрифтом показаны значения коэффициента корреляции синхронных связей II и HH .

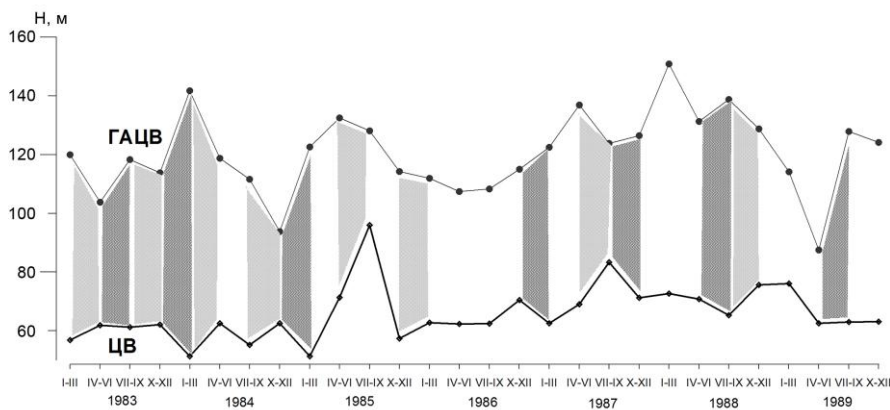
При уменьшении пространственного усреднения сезонных характеристик галоклина до размеров подрайона сохранились только менее устойчивые в многолетних изменениях связи II , а наиболее устойчивые в предшествующих вариантах анализа (табл. 1) связи HH исчезают.

Графическое представление сезонных изменений глубины положения галоклина в зонах ГАЦВ и ЦВ в двух подрайонах (рис. 3) демонстрирует периоды асинхронных компенсационных изменений. В северо-восточном подрайоне эта асинхронность достаточно стабильно наблюдается в октябре – де-

кабре и обусловлена в равной мере усилением как циклонической, так и антициклонической завихренности течений. В юго-восточном подрайоне компенсационные вертикальные движения галоклина наблюдаются в различные сезоны, но с устойчивым чередованием сезонов активизации и ослабления завихренности. В 1984, 1985 и 1987 гг. интенсификация завихренности здесь происходила в январе – марте, в 1983, 1988 и 1989 гг. — в июле – сентябре, в 1987 г. завихренность течений усиливалась еще и в октябре – декабре. В 1986 г. глубина положения галоклина в зонах подъема и опускания вод изменялась синхронно, что может свидетельствовать о преобладании влияния более глобальных факторов, чем региональные сезонные изменения интенсивности завихренности течений.



a



б

Рис. 3. Сезонные изменения глубины положения постоянного галоклина в зонах ЦВ и ГАЦВ в восточной половине Черного моря: *a* – северо-восточный подрайон, *б* – юго-восточный подрайон (■ – периоды компенсационных движений галоклина при усилении завихренности течений; □ – периоды компенсационных движений галоклина при ослаблении завихренности течений)

Следовательно, циркуляционная природа разнонаправленных вертикальных движений галоклина может проявляться при уменьшении усреднения данных во времени до сезонных значений, а в пространстве – до размеров 2° ш. \times 4° д.

Таким образом, усиление течений в слое галоклина в восточной половине Черного моря в исследуемые годы происходило преимущественно в осенне-зимний период, однако в юго-восточном подрайоне в отдельные годы наибольшая активность циркуляции отмечалась в летние месяцы. Выявленные сезонные особенности вертикальных движений постоянного галоклина в восточной половине Черного моря не противоречат современным представлениям о сезонных изменениях интенсивности циркуляции вод в слое 0 – 300 м [4, 10].

Возможные причины многолетних изменений исследуемых показателей и роль этих изменений в трансформациях биотических характеристик черноморской экосистемы были рассмотрены нами в работе [13].

Заключение. Выявленные особенности пространственно-временных изменений максимального градиента солености и глубины его положения в слое постоянного галоклина в восточной половине Черного моря в зонах подъема и опускания вод циклонических, глубоких антициклонических и малых антициклонических вихрей позволяют сделать ряд основных обобщений, выводов и предположений.

1. Основным свойством рассмотренных процессов было преобладание синхронности в изменениях градиентов солености и глубин положения галоклина в различных динамических образованиях. Компенсационная асинхронность вертикальных движений галоклина может проявляться при уменьшении усреднения данных во времени до сезонных значений, а в пространстве – до размеров 2° ш. \times 4° д. Это обуславливает повышенное внимание к регионализации исследований.

2. Использование предложенных показателей позволило установить в многолетних изменениях характеристик галоклина большую репрезентативность процессов, происходящих в глубоких антициклонических вихрях. Для межгодовой и сезонной изменчивости более значимы процессы, происходящие в малых антициклонических вихрях.

3. В северо-восточном подрайоне активизация завихренности течений достаточно стабильно наблюдалась в октябре – декабре и была обусловлена в равной мере усилением как циклонической, так и антициклонической завихренности течений. В юго-восточном подрайоне интенсификация завихренности происходила в январе – марте (в 1984, 1985 и 1987 гг.) и в июле – сентябре (в 1983, 1988 и 1989 гг.). При этом в большей степени проявляется усиление антициклонической завихренности, что и обуславливает в отдельные годы нетрадиционный сезонный ход интенсивности циркуляции вод в этом подрайоне.

4. Отмеченные многолетние и сезонные особенности вертикальных движений постоянного галоклина в восточной половине Черного моря не противоречат современным представлениям о сезонной и многолетней изменчивости интенсивности циркуляции вод в слое 0 – 300 м.

5. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования предложенных показателей состояния постоянного галоклина в исследованиях особенностей циркуляции вод и экосистемных функций синоптических вихрей Черного моря, они также могут быть полезны при планировании модельных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Еремеев В.Н., Иванов В.А., Тужилкин В.С.* Климатические черты внутригодовой изменчивости гидрофизических полей шельфовой зоны Черного моря. – Севастополь, 1991. – 53 с. – (Препринт / АН УССР. МГИ).
2. *Блатов А.С., Иванов В.А.* О вихреобразовании в Черном море // Комплексные исследования Черного моря. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1979. – С. 43 – 51.
3. *Голубев Ю.Н., Тужилкин В.С.* Некоторые аспекты синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря. – Севастополь, 1990. – 73 с. – (Препринт / АН УССР. МГИ).
4. *Кныш В.В., Кубряков А.И., Инюшина Н.В. и др.* Восстановление климатической сезонной циркуляции Черного моря на основе модели в σ -координатах с использованием ассимиляции данных о температуре и солености // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – Вып. 16. – С. 243 – 265.
5. *Ефимов В.В.* Изменение климата Черноморского региона // Там же. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – Вып. 13. – С. 322 – 334.
6. *Белокопытов В.Н., Шокурова И.Г.* Оценки междесятилетней изменчивости температуры и солености в Черном море в период 1951 – 1995 гг. // Там же. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – Вып. 12. – С. 11 – 20.
7. *Кныш В.В., Кубряков А.И., Моисеенко В.А. и др.* Тенденции в изменчивости термохалинных и динамических характеристик Черного моря, выделенные по результатам реанализа за период 1985 – 1994 гг. // Там же. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. Вып. 16. – С. 279 – 290.
8. *Шокурова И.Г.* Анализ междекадной изменчивости геострофической циркуляции вод Черного моря в зимний период // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – С. 276 – 279.
9. *Белокопытов В.Н., Шокурова И.Г., Полонский А.Б.* О десятилетней изменчивости температуры и солености в слое постоянного пикноклина в Черном море // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 15. – С. 223 – 225.
10. *Шокурова И.Г.* Сезонная и междекадная изменчивость геострофической циркуляции вод Черного моря // Системы контроля окружающей среды / Средства, информационные технологии и мониторинг. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – С. 329 – 332.

11. *Панов Б.Н.* Связи океанографических характеристик вод юго-восточной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды: Междунар. науч.-техн. семинар, 15 – 19 сентября 2008 г. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – С. 282 – 286.
12. *Панов Б.Н.* Возможности использования характеристик основного черноморского галоклина в исследованиях динамики состояния черноморской экосистемы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – Вып. 22. – С. 83 – 96.
13. *Панов Б.Н., Спиридонова Е.О.* Многолетние изменения и экосистемные связи характеристик основного черноморского галоклина, представленных в качестве показателей циркуляции вод // Уч. зап. Таврического нац. у-та им. В.И. Вернадского. Сер. «География». – Симферополь, 2011. – 24 (63), № 3. – С. 78 – 90.

Multi-year and seasonal variations of the characteristics of constant halocline in the eastern part of the Black Sea

B.N. Panov, E.O. Spiridonova

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russia

e-mail: panov_bn@mail.ru

Features of multi-year and seasonal changes in the characteristics of three types of constant halocline state corresponding to the water upwelling and downwelling zones in the eastern Black Sea in 1955 – 1994 are considered. Application of the proposed indexes permits to reveal that in multi-year changes of the halocline depth and intensity, the most important ones are the processes taking place in deep anticyclonic eddies, and as for inter-year and seasonal variability – the processes in small anticyclonic eddies. The main feature of the processes under examination consists in predominance of synchronism in gradient changes of the halocline salinity and depth in various dynamic formations. Compensating asynchronism of the halocline vertical movements in the water upwelling and downwelling zones is manifested only at decrease of time and space scales of data averaging up to the seasonal values and the dimension $2^\circ \text{ lat.} \times 4^\circ \text{ long.}$, respectively.

Keywords: Black Sea, constant halocline, synoptic eddies, seasonal and inter-annual variability.