

О МЕТОДЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

В.Н. Белокопытов

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: v.belokopytov@gmail.com

В статье описываются метод реконструкции термохалинной структуры моря, примененный для реанализа среднемесячных полей Черного моря за период 1923–2012 гг. на основе архивных океанографических данных. Методика восстановления полей состоит в сочетании методов оптимальной интерполяции и эмпирических ортогональных функций. Обсуждаются вопросы согласования горизонтальной и вертикальной структуры полей, ошибок реанализа и оптимизации расчетов.

Введение. Массивы реанализа (реконструкции физического состояния окружающей среды на регулярной пространственно-временной основе за определенный исторический период) широко используются в климатической науке. Это, в первую очередь, наиболее известные реанализы атмосферных полей – NCEP/NCAR, ERA, JRA и др. В последние годы стали создаваться массивы реанализа термохалинных полей как для всего Мирового океана, например, ECWMF-Ocean, NCEP/GODAS, GECCO, SODA, GLORYS2 (Mercator) и др., так и для отдельных морей. Основной метод реанализа океана, как и для атмосферы – использование полных гидродинамических моделей с ассимиляцией первичных данных.

Для Черного моря в МГИ НАН Украины был осуществлен реанализ для периода 1971 – 1993 гг. [1] с помощью региональной модели [2], основанной на версии модели POM, с использованием модели турбулентности Меллора и Ямады, ассимиляции на основе фильтра Калмана, атмосферного воздействия из реанализа ERA-40. Еще один массив реанализа был создан для периода 1992 – 2002 гг. на основе ассимиляции спутни-

ковых альтиметрических данных [3] и ERA-40.

Несомненное преимущество реанализов, полученных с использованием гидродинамических моделей, заключается в том, что принцип восстановления полей, основан на непосредственном учете физики процессов в морской среде. Использование сложных гидродинамических моделей имеет и обратную сторону – степень расхождения результатов расчета от реальных полей зависит от большого количества факторов, которые относятся как к самой модели (параметризация процессов, численная реализация, пространственное разрешение), так и к задаваемым внешним воздействиям (потоки тепла и влаги, ветер). Как следствие, результаты существенным образом зависят от выбора массива атмосферных полей, а временной охват реанализа океана ограничен не только количеством ассимилируемых гидрологических данных, но и временным периодом используемого атмосферного реанализа (обычно не более 50 лет).

Другой подход в создании массивов реанализа океана состоит в восстановлении полей методами, основанными на статистической структуре данных, такими как оптимальная интерполяция, эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) и др. На этом принципе основаны работы [4 – 11], в том числе для Черного моря [12]. К недостаткам этого направления можно отнести достаточно формальный подход, явным образом не учитывающий физику явлений. Преимуществом является то, что внешние воздействия, как правило, не учитываются, результаты зависят только от количества и распределения гидрологических данных, а временной период реанализа может превышать 100 лет.

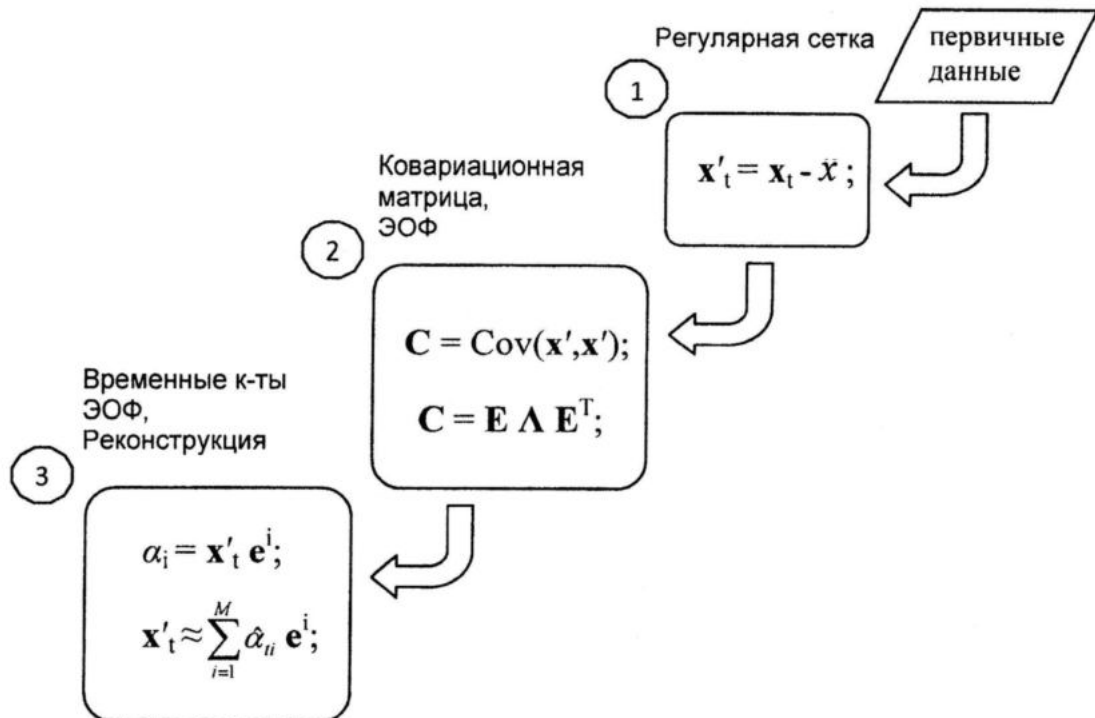
Целью исследования является адаптация метода восстановления полей на основе ЭОФ для создания массива реанализа термохалинной структуры Черного моря за весь период наблюдений.

Описание метода. Начиная с работы Лоренца [13] методы ЭОФ очень широко используются в гидрометеорологии. Основная их функция состоит в разложении пространственно-временной измен-

чивости полей на отдельные составляющие, из которых бóльшая часть в дальнейшем отсекается, как обусловленная шумами или высокочастотными процессами. В океанологии ЭОФ применяются как для анализа структуры и изменчивости гидрофизических полей [14–16], для

реконструкции исторических массивов данных [5–12] и, наиболее часто, при поиске статистических связей в исследованиях долгопериодных процессов.

Общий принцип использования ЭОФ в выше упомянутых реанализах состоит в следующем (рис. 1).



Р и с. 1. Общая схема реконструкции полей по ЭОФ

На 1-м этапе первичные данные приводятся к регулярному виду: осредняются или интерполируются в узлы сетки для фиксированных моментов времени. В результате образуется набор векторов (полей) в виде аномалий от среднего,

$$\mathbf{x}'_t = \mathbf{x}_t - \bar{\mathbf{x}}$$

с пропусками в пространстве и времени.

На 2-м этапе рассчитывается общая ковариационная (или корреляционная) матрица

$$\mathbf{C} = \text{Cov}(\mathbf{x}', \mathbf{x}')$$

по всему набору векторов \mathbf{x}'_t . Матрица \mathbf{C} обычно сглаживается каким-либо пространственным фильтром. Далее для \mathbf{C} решается задача поиска собственных чисел и векторов

$$\mathbf{C} = \mathbf{E} \mathbf{\Lambda} \mathbf{E}^T$$

где \mathbf{E} – матрица собственных векторов (ЭОФ); $\mathbf{\Lambda}$ – диагональная матрица собственных чисел.

Относительный вклад j -ой моды ЭОФ в полную дисперсию определяется как

$$(\lambda_j / \sum_{k=1}^N \lambda_k) \cdot 100\%,$$

где λ_j – собственное число j -ой моды ЭОФ; N – общее количество мод.

На 3-м, последнем этапе для каждого вектора (поля) \mathbf{x}'_t рассчитываются временные коэффициенты для каждой моды

$$\alpha_{ti} = \mathbf{x}'_t \mathbf{e}^i$$

и, путем обратной процедуры, восстанавливается поле во всех узлах

$$\mathbf{x}'_t \approx \sum_{i=1}^M \hat{\alpha}_{ti} \mathbf{e}^i$$

где M – количество старших мод, участвующих в реконструкции.

В данной работе реконструкция термохалинных полей была реализована в соответствии с этой общей схемой со следующими особенностями:

1 этап. Для регуляризации первичных данных применялся метод оптимальной интерполяции (ОИ). С учетом результатов работ по изучению корреляционной структуры термохалинных полей Черного моря [17 – 19] было принято допущение о изотропности пространственных корреляционных функций. Для пространственной автокорреляционной функции μ использовалась аппроксимация аналитическим выражением

$$\mu(r) = \exp(-ar^2),$$

где $a = 0.21 + 8.7 \cdot 10^{-5}z$,
 где z – глубина, м;
 $r = L/15$ – относительный сдвиг;
 L – расстояние, мили.

В качестве нормы принимались климатические поля, мера ошибки наблюдений включала инструментальную погрешность и мезомасштабную изменчивость, система уравнений для расчета весов интерполяции решалась методом Гаусса.

Массив интерполированных значений (массив ОИ) был рассчитан для периода наблюдений 1922 – 2012 гг. с временной дискретностью 10 суток и 1 месяц, с пространственным разрешением $10' \times 15'$, т.е. 10 миль по широте (18.5 км) и 10.2 – 11.3 миль по долготе (19 – 21 км). Максимальное покрытие акватории моря составило 1120 узлов сетки, вертикальное разрешение – 67 горизонтов с постепенным увеличением шага от 5 до 200 м.

2 этап. Ковариационная матрица C сглаживалась 3-точечным фильтром Шапиро пятью итерациями отдельно для рядов и столбцов матрицы. Поиск собственных векторов E осуществлялся с помощью процедур из программных библиотек ALGLIB/LAPACK, преобразующих симметричную матрицу C в трехдиагональную форму, а затем применяющих к ней QL/QR алгоритмы.

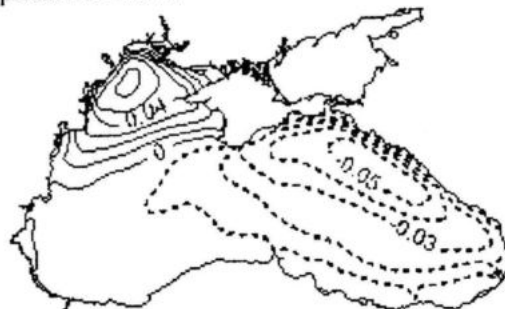
Пример одной из рассчитанных ЭОФ приведен на рис. 2.

3 этап. Временные коэффициенты ЭОФ, учитывая пропуски в полях x'_j , рассчитывались аналогично методу наименьших квадратов

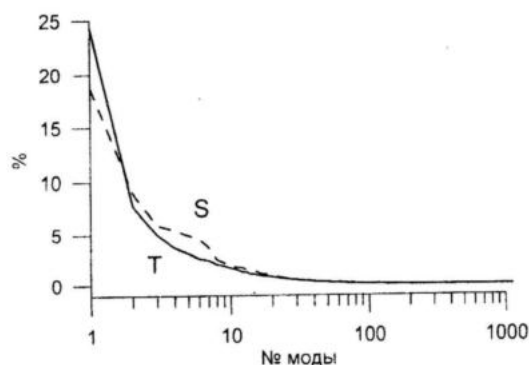
$$\hat{\alpha}_i = \frac{\sum_{j \in K} x'_j e_j^i}{\sum_{j \in K} |e_j^i|^2},$$

где $K = \{j: x'_j \text{ значения без пропусков}\}$.

В реконструкции полей использовалось 20 горизонтальных мод, вносящих до 75 % общей дисперсии в поверхностном слое моря (рис. 3) и до 50 % на горизонте 200 м.



Р и с. 2. 2-я горизонтальная мода ЭОФ температуры воды на поверхности моря. Штриховыми линиями отображены отрицательные значения



Р и с. 3. Относительный вклад горизонтальных мод ЭОФ в общую дисперсию температуры и солёности в поверхностном слое моря

При анализе результатов реконструкции полей выяснилось, что подобный подход, использовавшийся ранее только для поверхностных полей, при последовательном применении к каждому горизонту плохо подходит для восстановления термохалинной структуры в целом. По сравнению с исходным массивом ОИ межгодовые аномалии значительно возрастали по абсолютному значению, вертикальная структура полей во многих случаях искажалась сильными инверсиями. При увеличении количества используемых мод размах колебаний усиливался, при уменьшении – размах колебаний снижался, но пространственная структура аномалий существенно изменялась в сравнении с исходным массивом ОИ.

Ошибки в определении знака и величины межгодовых колебаний связаны, главным образом, с сильной зависимостью погрешности оценки временного коэффициента α_{ii} от распределения исходных данных по акватории в тот конкретный период времени, для которого происходит расчет. Возникновение искусственных вертикальных инверсий, как известно по опыту создания климатических массивов океана, часто связано с вертикальной несогласованностью полей при расчетах в условиях неравномерной обеспеченности данными по глубине. Поэтому, горизонтальные ЭОФ в дальнейшем использовались только для анализа изменчивости на отдельных горизонтах, а для реконструкции термохалинной структуры был разработан новый метод, основанный на сочетании вертикальных и горизонтальных ЭОФ.

Общая схема расчета по новому методу в целом аналогична приведенной выше схеме для горизонтальных ЭОФ, но имеются ряд существенных отличий:

1. Сначала по массиву ОИ рассчитываются Ψ – вертикальные ЭОФ (функции от z). Исходные векторы x'_i в этом случае представляют собой аномалии среднемесячного климатического вертикального профиля в узле сетки. При этом, ЭОФ для температуры рассчитывались отдельно для теплого и холодного полугодий, а для солености – среднегодовые, т.к. сезонных различий для них выявлено не было (рис. 4).

2. Затем рассчитываются ряды временных коэффициентов вертикальных ЭОФ в каждом узле сетки для каждой вертикальной моды $\beta_{ii} = x'_i \psi^i$.

Далее, в качестве исходных горизонтальных полей принимаются β_{ii} и для них находится E – матрица горизонтальных ЭОФ временных коэффициентов вертикальных мод ЭОФ (пример на рис.5).

3. На последнем этапе, для каждого поля β_{ii} рассчитываются временные коэффициенты для каждой горизонтальной моды ЭОФ

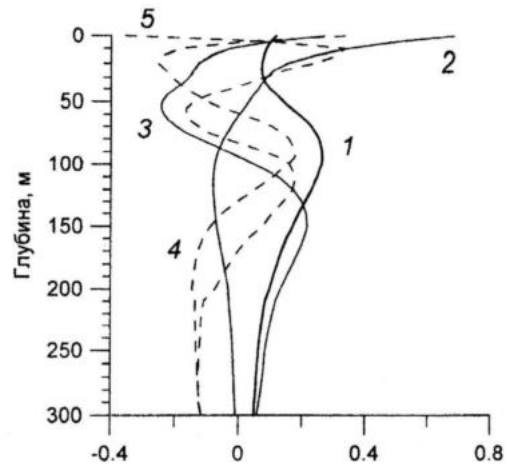
$$\alpha_{ii} = \beta_{ii} e^i$$

и, путем двух обратных процедур, восстанавливаются вертикальные профили в каждом узле расчетной области

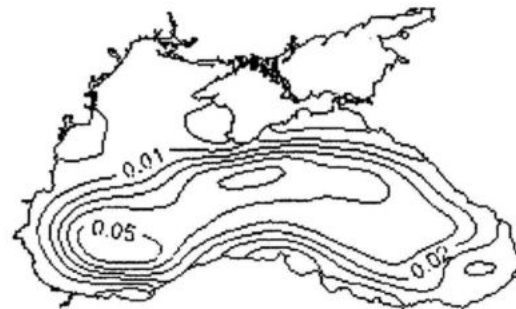
$$\beta_{ii} \approx \sum_{i=1}^M \hat{\alpha}_{ii} e^i,$$

$$x'_i \approx \sum_{i=1}^L \hat{\beta}_{ii} \psi^i,$$

где M – количество горизонтальных мод; L – количество вертикальных мод, участвующих в восстановлении полей.



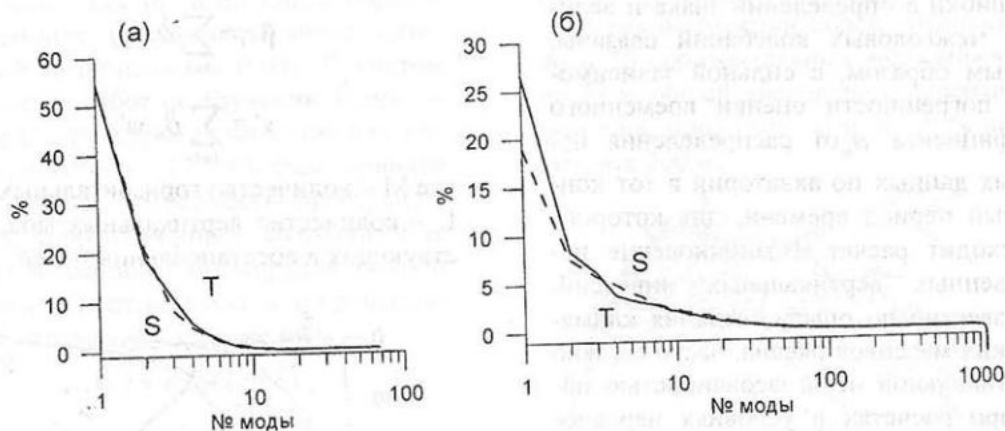
Р и с. 4. Вертикальные ЭОФ солености. Цифрами обозначены номера мод



Р и с. 5. 1-я горизонтальная мода временных коэффициентов 1-й вертикальной моды ЭОФ солености

Несмотря на некоторую громоздкость общей конструкции – наличие двух разных наборов мод и их сочетаний, реализация алгоритма становится более эффективной. Уменьшение времени вычислений позволило провести достаточное количество численных экспериментов для выбора наиболее оптимального количества вертикальных и горизонтальных мод.

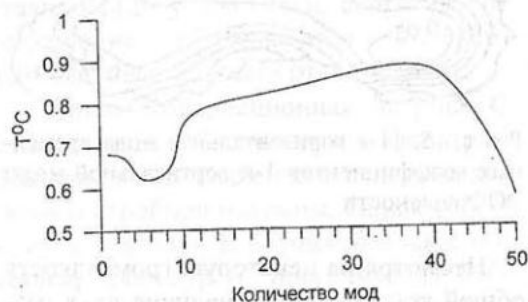
Спектры собственных чисел ЭОФ (рис. 6) демонстрируют гораздо большую концентрацию дисперсии колебаний в области старших мод, чем в случае чисто горизонтальных ЭОФ (рис. 3).



Р и с. 6. Относительный вклад в общую дисперсию температуры и солёности: а) – вертикальных мод ЭОФ; б) – горизонтальных мод ЭОФ временных коэффициентов 1-й вертикальной моды

Уже первые 10 мод обеспечивают около 98 % общей дисперсии для вертикальных ЭОФ и до 60 % дисперсии для горизонтальных ЭОФ временных коэффициентов вертикальных мод.

В конечном итоге, для реанализа было выбрано 5 вертикальных мод и 5 горизонтальных мод временных коэффициентов вертикальных мод ЭОФ. Такое сочетание обеспечило минимальное отклонение от исходного массива ОИ (рис.7), значительное снижение количества искусственных вертикальных инверсий и существенную экономию времени вычислений.



Р и с. 7. Среднеквадратическая разность между значениями в массивах реанализа и ОИ для температуры на поверхности моря в зависимости от количества горизонтальных мод ЭОФ временных коэффициентов вертикальных мод

Заключение. В результате применения методов оптимальной интерполяции и эмпирических ортогональных функций создан массив реанализа среднемесячных термохалинных полей Черного моря за период 1923–2012 гг.

Для реконструкции термохалинной структуры была разработана новая методика, основанная на сочетании вертикальных и горизонтальных ЭОФ. В отличие от традиционного метода горизонтальных ЭОФ, в ней лучше обеспечивается согласование горизонтальной и вертикальной структуры полей, уменьшается количество грубых ошибок и сокращается время расчетов.

Несмотря на это, восстановить непрерывный ряд среднемесячных полей за весь период океанографических наблюдений в Черном море с 1890 по 2012 гг. по ЭОФ не удастся. При реконструкции значений для всей акватории моря, приемлемый результат может быть получен лишь при наличии измерений в нескольких районах моря. Частично, пропуски отдельных месяцев могут быть заполнены с помощью авторегрессионной модели временных коэффициентов ЭОФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кныш В.В., Коротяев Г.К., Моисеенко В.А., Кубряков А.И., Белокопытов В.Н., Инюшина Н.В. Сезонная и межгодовая изменчивость гидрофизических полей Черного моря, восстановленных на основе реанализа за период 1971 – 1993 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 47, № 3. – С. 433 – 446.
2. Кубряков А.И. Применение технологии вложенных сеток при создании системы мониторинга гидрофизических полей в прибрежных районах

- Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 11. – С. 31 – 50.
3. *Дорофеев В.Л.* Моделирование декадной изменчивости экосистемы Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2009. – № 6. – С. 71 – 81.
 4. *Reynolds R.W., Smith T.M.* Improved global sea surface temperature analysis using optimum interpolation // *J. Climate.* – 1994. – 7. – P. 929 – 948.
 5. *Reynolds R.W., Rayner N.A., Smith T.M., Stokes D.C., Wang W.* An improved in situ and satellite SST analysis for climate // *J. Climate.* – 2002. – 15. – P. 1609 – 1625.
 6. *Kaplan A., Kushnir Y., Cane M.A., Blumenthal M.B.* Reduced space optimal analysis for historical datasets: 136 years of Atlantic sea surface temperatures // *J. Geoph. Res.* – 1997. – 102. – P. 27835 – 27860.
 7. *Kaplan A., Kushnir Y., Cane M.A.* Reduced space optimal interpolation of historical marine sea level pressure: 1854-1992 // *J. Climate.* – 2000. – 13. – P. 2987 – 3002.
 8. *Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E. C., Kaplan A.* Global analyses of SST, sea ice and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* – 2003. – 108. – P. 4407.
 9. *Smith, T. M., and R. W. Reynolds.* Improved extended reconstruction of SST (1854-1997) // *J. Climate.* – 2004. – 17. – P. 2466 – 2477.
 10. *Beckers J.-M., Rixen M.* EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic data sets // *J. Atm. Ocean. Techn.* – 2003. – 20. – P. 1839 – 1856.
 11. *Alvera-Azcárate A., Barth A., Rixen M., Beckers J.M.* Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using Empirical Orthogonal Functions. Application to the Adriatic Sea surface temperature // *Ocean Modelling.* – 2005. – 9. – P. 325 – 346.
 12. *Alvera-Azcárate A., Barth A., Sirjacob D., Beckers J.-M.* Enhancing temporal correlations in EOF expansions for the reconstruction of missing data using DINEOF // *Ocean Sci.* – 2009. – 5. – P. 475 – 485.
 13. *Lorenz E.* Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction // Scientific Report No. 1, Air Force Cambridge Research Center, Air Research and Development Command, Cambridge Mass, 1956.
 14. *Preisendorfer R.W.* Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography // *Developments in Atmospheric Science*, 17, Elsevier, Amsterdam, 1988.
 15. *Fukumori I., Wunsch C.* Efficient representation of the North Atlantic hydrographic and chemical distributions // *Prog. Oceanogr.* – 1997. – 27. – P. 2146 – 2157.
 16. *Sparnocchia S., Pinardi N., Demirov E.* Multivariate Empirical Orthogonal Function analysis of the upper thermocline structure of the Mediterranean Sea from observations and model simulations // *Annales Geophysicae.* – 2003. – 1(II). – P. 167 – 188.
 17. *Белокопытов В.Н., Полонский А.Б.* О пространственной статистической структуре термохалинных полей Черного моря // Морские технологии и приборостроение: науч.-техн. семинар., 1993 г.: тезисы докл. – Севастополь: МГИ АН Украины, 1993. – С. 25 – 26.
 18. *Григорьев А.В., Иванов В.А., Капустина Н.А.* Корреляционная структура термохалинных полей Черного моря в летний сезон // *Океанология.* – 1996. – Т. 36, №3. – С. 364 – 369.
 19. *Шокурова И.Г.* Долгопериодная изменчивость гидрологических полей и геострофической циркуляции в Черном море: автореферат дис. канд. географ. наук: 11.00.08. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – 23 с.