

## Воспроизведение изменчивости уровня и характеристик пикноклина Черного моря на основе метода адаптивной статистики

П. Н. Лишаев\*, В. В. Кныш, Г. К. Коротаев

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*E-mail: pavellish@mail.ru*

Поступила в редакцию 25.12.2017 г., после доработки – 20.02.2018 г.

Ретроспективный анализ гидрофизических полей Черного моря выполнен за 1993–2014 гг. с ассимиляцией восстановленных ранее трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солёности в модели на горизонтах слоя 63–500 м методом адаптивной статистики. Для сопоставления среднеквадратических отклонений полей температуры и солёности от наблюдений привлекались данные реанализа за 1993–2012 гг. с ассимиляцией в модели профилей невозмущенных температуры и солёности. В реанализе за 1993–2014 гг. удается более точно воспроизвести изменчивость профилей температуры, солёности (плотности) в главном пикноклине. Среднеквадратические отклонения воспроизведенных в реанализе за 1993–2014 гг. полей уровня моря относительно полей альтиметрического уровня в первой декаде сезонной и межгодовой изменчивости меньше по сравнению с оцененными таким же образом среднеквадратическими отклонениями по данным реанализа за 1992–2015 гг. работ других авторов, в котором ассимилировались потреховые данные AVISO и поверхностная температура моря. Среднеквадратические отклонения уровня моря увеличились во второй декаде периода. Причина этого кроется в понижении точности восстановления полей псевдоизмерений температуры и солёности по данным альтиметрии и буев *Argo* по мере уменьшения обучающей выборки. Синоптическая изменчивость полей течений моря за 1993–2014 гг. исследовалась посредством анализа карт интегральной дисперсии уровня моря. Дисперсия уровня оказалась высокой в обширных областях на западе и востоке бассейна. Она обусловлена генерацией и движением Севастопольского антициклона, образованием синоптических вихрей в юго-западном районе западного циклонического круговорота вод, динамикой и эволюцией кавказских антициклонических вихрей и Батумского антициклона. Выделяется также локальный район северо-западнее Синопа.

**Ключевые слова:** реанализ, псевдоизмерения, адаптивная статистика, среднеквадратические отклонения, синоптическая изменчивость, интегральная дисперсия.

**Благодарности:** результаты исследования, приведенные в рубрике «Развитие метода совместной ассимиляции альтиметрического уровня Черного моря и ограниченных данных измерений буев-профилемеров *Argo*», получены в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011 «Исследования закономерностей изменений состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (шифр «Оперативная океанография»). Остальные результаты исследований, представленные в работе, получены при финансовой поддержке РФФИ, грант № 16-05-00621. Авторы выражают глубокую признательность В. Л. Дорощеву за предоставление данных по уровню Черного моря, восстановленному по реанализу гидрофизических полей за 1992–2015 гг.

**Для цитирования:** Лишаев П. Н., Кныш В. В., Коротаев Г. К. Воспроизведение изменчивости уровня и характеристик пикноклина Черного моря на основе метода адаптивной статистики // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 4. С. 271–282. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-271-282

## Reproduction of Variability of the Black Sea Level and Pycnocline Characteristics Based on the Adaptive Statistics Method

P. N. Lishaev\*, V. V. Knysh, G. K. Korotaev

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: pavellish@mail.ru*

Retrospective analysis of the Black Sea hydrophysical fields (1993–2014) is carried out including assimilation of the three-dimensional fields of the temperature and salinity pseudo measurements reconstructed before in the

© Лишаев П. Н., Кныш В. В., Коротаев Г. К., 2018

model on the horizons within the layer 63–500 m by the adaptive statistics method. To compare root-mean-square deviations of the temperature and salinity fields from the observations, the reanalysis data (1993–2012) comprising assimilation of the temperature and salinity unperturbed profiles in the model are used. Variability of temperature and salinity (density) profiles in the main pycnocline is reproduced more accurately in the reanalysis for 1993–2014. Root-mean-square deviations of the sea level fields (resulted from the reanalysis for 1993–2014) from the altimetry ones in the first decade of seasonal and inter-annual variability are smaller than those (estimated in the same way) obtained from the reanalysis data for 1992–2015 in which the AVISO data and the sea surface temperature are assimilated. The root-mean-square deviations of the sea level increase in the second decade of the period. It is explained by the fact that decrease of the training set is accompanied by lowering of accuracy in reconstructing the fields of the temperature and salinity pseudo-measurements based on the altimetry and Argo buoys' data. Synoptic variability of the sea currents' fields in 1993–2014 is studied by analyzing the maps of the sea level integral dispersion. The values of sea level dispersion are found to be high on vast areas in the western and eastern parts of the basin. It is conditioned by generation and movement of the Sevastopol anticyclone, formation of synoptic vortices in the southwestern region of the western cyclonic water cycle, dynamics and evolution of the Caucasian anticyclonic vortices and the Batumi anticyclone. The local area to the northwest off Sinop is also noted.

**Keywords:** reanalysis, pseudo measurements, adaptive statistics, RMS deviation, synoptic variability, integral dispersion.

**Acknowledgments:** the investigation results represented in the section “Development of the method of joint assimilation of the Black Sea altimetry level and the limited measurement data of the profile-meters Argo” are obtained within the framework of the state task on the theme № 0827-2014-0011 “Studies of regularities of the marine environment state changes based on the operational observations and the nowcast, forecast and reanalysis system data on the marine environment state” (code “Operational oceanography”). The rest of the investigation results cited in the paper are obtained at the RFFR financial support, grant № 16-05-00621. The authors express their deep gratitude to V. L. Dorofeev for providing the data on the Black Sea level reconstructed based on reanalysis of the hydrophysical fields for 1992–2015.

**For citation:** Lishaev, P. N., Knysh, V. V. and Korotaev, G. K., 2018. Reproduction of variability of the Black Sea level and pycnocline characteristics based on the adaptive statistics method. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(4), pp. 271-282. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-271-282 (in Russian).

## Введение

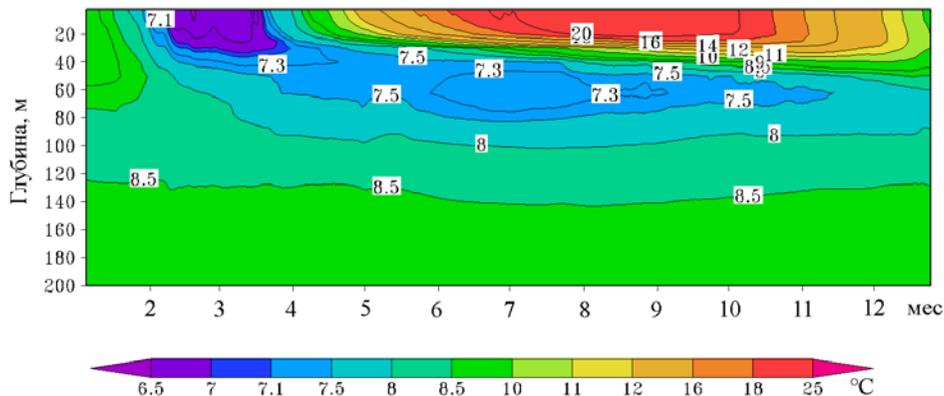
В предыдущих исследованиях авторов [1–4] на основе предположения об адиабатичности смещений изотермических и изохалинных поверхностей в пределах главного пикноклина моря предложена методика восстановления псевдонаблюдений температуры и солёности морской воды в акватории бассейна Чёрного моря по данным альтиметрических измерений. В работах [4, 5] посредством ассимиляции этих данных выполнен реанализ полей Чёрного моря с последовательным улучшением метода усвоения построенных трёхмерных массивов полей температуры и солёности. Более совершенным среди представленных в работах [4, 5] подходов является метод адаптивной статистики, позволяющий учитывать изменения дисперсии ошибок прогноза во времени и по пространству. В отличие от методов ассимиляции измерений гидрофизических параметров океана (моря) в моделях, основанных на ансамблевых фильтрах Калмана [6–8] и вариационном усвоении данных наблюдений [9–11], метод адаптивной статистики не требует использования мощных вычислительных систем.

На примере реанализа полей моря за 2012 г. с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солёности в модели в слое 100–500 м методом адаптивной статистики продемонстрированы результаты уточнения воспроизведенных гидрофизических параметров [5]. Вместе с тем показано, что вследствие неточности модели термодинамики верхнего слоя моря (2,5–100 м) среднеквадратические отклонения (СКО) восстановленных в модели полей температуры от наблюдений на горизонтах этого слоя оказались высокими, а средняя по горизонтам температура в сезонном ходе холодного промежуточного слоя (ХПС) – завышенной.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы уточнить восстановление гидрофизических полей моря путем ассимиляции псевдоизмерений температуры и солёности в модели на дополнительных горизонтах 63–88 м в реанализе за 2012 г. В работе выполнен анализ сезонной, межгодовой и десятилетней изменчивости среднеквадратических отклонений уровня моря, а также синоптической изменчивости полей течений на основе изучения карт интегральной дисперсии уровня моря за 1993–2014 гг.

### Развитие метода совместной ассимиляции альтиметрического уровня Черного моря и ограниченных данных измерений буев-профилемеров *Argo*

Трёхмерные поля псевдоизмерений температуры и солёности за 1993–2002 гг. были восстановлены ранее на горизонтах модели Морского гидрофизического института (МГИ) в слое моря 100–500 м в его глубоководной части, ограниченной изобатой 500 м, на основе совместного анализа данных альтиметрии и судовых измерений с использованием методологии, описанной в [3]. В работе [4] предложенная методика была адаптирована к измерениям профилей солёности и температуры буями *Argo*, что позволило восстановить трёхмерные поля псевдоизмерений температуры и солёности за период 1993–2014 гг. Изменения топографии изопикнических, изотермических и изохалинных поверхностей, как показал анализ, выполненный в работе [3], происходят в основном адиабатически на глубинах от 50–100 м до 1100–1200 м. С учетом этого результата коррекция модельных значений температуры и солёности при выполнении реанализа гидрофизических полей за 2012 г. осуществлялась на горизонтах 63, 75, 88 м и на всех последующих горизонтах методом адаптивной статистики, тогда как ранее псевдоизмерения ассимилировались только начиная с глубины 100 м.

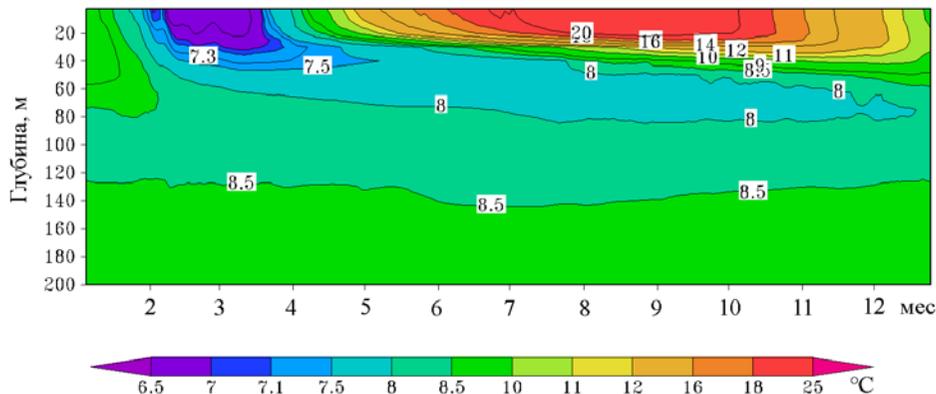


**Р и с. 1.** Диаграмма сезонной изменчивости средней по горизонтам температуры (°C), восстановленной по реанализу за 2012 г. с ассимиляцией псевдоизмерений в слое 63–500 м

**Fig. 1.** Diagram of seasonal variability of the average over horizons temperature (°C) reconstructed based on the reanalysis for 2012 including assimilation of pseudo-measurements in the layer 63–500 m

Оказалось, что влияние полей псевдоизмерений температуры и солёности, ассимилируемых на горизонтах 63, 75, 88 м, положительно сказывается на оценке интенсивности синоптических вихрей. Оно заметно также при вос-

произведении ХПС моря. Сопоставление рис. 1 и 2 показывает, что коррекция модельной температуры псевдоизмерениями на горизонтах 63, 75, 88 м приводит к увеличению степени обновления ХПС моря зимой 2012 г., в результате чего увеличивается его холодозапас. Это видно на рис. 1 по расположению изолинии 7,5°C. Видно также, что толщина ХПС по расположению верхней и нижней границ изолиний 8°C в течение всего года существенно больше, чем на рис. 2. Полученный результат подтверждается данными табл. 7.1 из работы [12], в которой 2012 г. по гидрологическим данным для всего моря характеризуется сильной степенью обновления ХПС.



**Р и с. 2.** Диаграмма сезонной изменчивости средней по горизонтам температуры (°C), восстановленной по реанализу за 2012 г. с ассимиляцией псевдоизмерений в слое 100–500 м

**F i g. 2.** Diagram of seasonal variability of the average over horizons temperature (°C) reconstructed based on the reanalysis for 2012 including assimilation of pseudo-measurements in the layer 100–500 m

### Описание основного расчета

В настоящей работе выполнен реанализ гидрофизических полей Черного моря за 1993–2014 гг. посредством ассимиляции трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солёности в вихреразрешающей модели МГИ [13] в слое 63–500 м методом адаптивной статистики. Шаг сеточной области по горизонтали равнялся 5 км. Отметим, что в используемой версии модели МГИ коэффициенты турбулентного обмена импульсом, теплом и солью по вертикали рассчитывались с использованием параметризации Пакановски – Филандера [14].

За начальные поля в модели на 01.01.1993 г. принимались поля температуры, солёности, уровня и скоростей течений, полученные в реанализе гидрофизических полей моря за 1980–1993 гг. [15]. Значения дисперсий ошибок прогноза в начальный момент времени равнялись значениям типичных дисперсий [5]. Данные псевдоизмерений температуры и солёности ассимилировали в уравнениях переноса тепла и соли на каждом шаге по времени. Дисперсия ошибок псевдоизмерений на горизонтах слоя 63–500 м принималась равной квадрату их среднемесячных СКО относительно имеющихся измерений. При проведении расчета осадки, испарения и потоки тепла на поверхности моря брались из данных атмосферного реанализа *ERA-Interim* [16]. Их

разрешение по пространству равно  $0,75^\circ$ , по времени – 12 ч. Поля тангенциального напряжения трения ветра известны на каждые 6 ч.

Дисперсии ошибок псевдонаблюдений, как и граничные поля, интерполировали на каждый шаг по времени численной модели. Данные реанализа за 1993–2014 гг. включают среднесуточные значения температуры, солёности, горизонтальных и вертикальной составляющих вектора скорости течений, уровня моря, а также модельных дисперсий ошибок прогноза температуры и солёности.

**Статистические характеристики ошибок восстановленных в реанализе полей температуры и солёности.** Оценки среднеквадратических отклонений между полями температуры и солёности реанализа и измерениями на гидрологических станциях и буями *Argo* в Черном море рассчитывались за весь период времени с 1993 по 2014 гг. в 5 слоях глубоководного бассейна от поверхности до дна. Отметим, что ранее в работе [2] были представлены результаты реанализа полей моря за 1993–2012 гг., выполненного посредством ассимиляции в модели МГИ профилей невозмущенных температуры и солёности, построенных в [4] по приведенной в [1, 3] методике. В работе [2] использовался такой же атмосферный форсинг, как и в реанализе с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солёности в модели МГИ методом адаптивной статистики [5]. По полученным данным с целью сопоставления прежних результатов с настоящим расчетом оценены соответствующие СКО и средние отклонения (СО) температуры и солёности. Средние отклонения рассчитывали посредством вычитания из модельных значений температуры и солёности измеренных значений на гидрологических станциях и буях *Argo*. Значения СКО и СО для температуры приведены в табл. 1, для солёности – в табл. 2.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Среднеквадратические (СКО) и средние (СО) отклонения восстановленных по модели полей температуры: I – по методу адаптивной статистики; II – с ассимиляцией профилей невозмущенных температуры и солёности**

**Root-mean-square (RMS) and average (A) deviations of the model-derived temperature fields: I – based on the adaptive statistics method; II – using assimilation of the temperature and salinity unperturbed profiles**

Слой, м/Layer, m	СКО/RMS		СО/A
	I	II	I
0–5	1,559	1,963	–0,830
5–30	3,331	3,155	1,220
30–100	0,953	1,239	0,320
100–300	0,130	0,248	–0,003
300–500	0,036	0,037	0,0001
500–2000	0,012	0,019	0,109

Согласно табл. 1, в слоях 0–5 и 5–30 м отдать предпочтение каким-либо данным реанализа невозможно. Во всех расчетах максимальные значения СКО получены в слое 5–30 м, что объясняется недостатками модели термодинамики верхнего слоя моря. В деятельном слое моря, включающем основной пикноклин (слои 30–100 и 100–300 м), СКО температуры по данным настоящего расчета с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солёности методом адаптивной статистики ниже, чем в реанализе с ассимиляцией невозмущенных профилей температуры и солёности. Такое же соотношение между СКО наблюдается в слое 500–2000 м. Значения СКО в слое 300–500 м слабо отличаются между собой.

Т а б л и ц а 2  
T a b l e 2

**Среднеквадратические (СКО) и средние (СО) отклонения восстановленных по модели полей солёности: I – по методу адаптивной статистики; II – с ассимиляцией профилей невозмущенных температуры и солёности**

**Root-mean-square (RMS) and average (A) deviations of the model-derived salinity fields: I – based on the adaptive statistics method; II – using assimilation of the temperature and salinity unperturbed profiles**

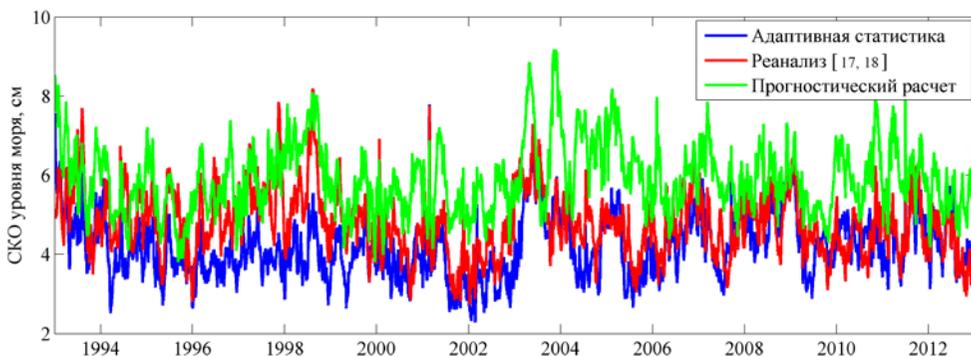
Слой, м/Layer, m	СКО/RMS		СО/A
	I	II	I
0–5	0,625	0,624	0,034
5–30	0,487	0,485	–0,098
30–100	0,413	0,500	–0,134
100–300	0,176	0,343	–0,007
300–500	0,043	0,051	–0,010
500–2000	0,025	0,019	0,004

Как следует из табл. 1, восстановленная в настоящем расчете температура в поверхностном слое 0–5 м и в слое 100–300 м занижена. В остальных слоях она завышена. Максимальное завышение температуры получено в верхнем слое 5–30 м, в котором ассимиляция псевдоизмерений не выполнялась. В слое 30–100 м СО температуры существенно ниже, что объясняется коррекцией модельной температуры псевдоизмерениями на горизонтах 63, 75, 88, 100 м. В глубоководном слое 500–2000 м незначительное завышение температуры обусловлено слабой пространственной изменчивостью термохалинных параметров моря.

Сравнительное сопоставление СКО восстановленной в двух реанализах солёности (табл. 2) показывает, что в слоях 0–5 и 5–30 м эти статистические характеристики почти одинаковы. Рассчитанная оценка СКО солёности в главном галоклине (слои 30–100 и 100–300 м) и глубже (слой 300–500 м) по данным реанализа с усвоением псевдоизмерений солёности в модели методом адаптивной статистики существенно ниже. Этот результат объясняется хорошим качеством восстановленных в пикноклине трехмерных полей псевдоизмерений солёности. Средние отклонения солёности во всех слоях, кроме слоев 0–5 и 500–2000 м, отрицательные, что свидетельствует о ее занижении в этих слоях. Следует заметить, что значения СО солёности во всех слоях моря невысоки.

**Статистические характеристики точности воспроизведенных в реанализе полей уровня моря.** Опубликованные в работах [17, 18] результаты реанализа полей моря за 1992–2015 гг. позволяют провести сопоставление двух методов расчета. Реанализ работ [17, 18] выполнен с использованием ассимиляции уровня, восстановленного по альтиметрии, спутниковых измерений температуры поверхности моря и комбинированных профилей температуры и солёности в модели МГИ. Последние представляли собой среднегодовые (по данным имеющихся измерений) профили температуры и солёности, скорректированные климатической сезонной изменчивостью. В работах [17, 18] использовались те же атмосферные поля, что и в наших расчетах.

Поля альтиметрического уровня моря, рассчитанные на каждые сутки за 1993–2014 гг., позволили оценить СКО модельного уровня моря по данным двух реанализов. Представляет интерес их сопоставление с СКО уровня моря, полученными по данным чисто прогностического расчета. Последний был проведен на 20 лет с 1993 по 2012 г. с использованием полей атмосферы реанализа *ERA-Interim* [16]. На рис. 3 видно, что СКО уровня в прогностическом расчете заметно выше. Значения СКО уровня моря (относительно альтиметрического) по данным нашего реанализа в первой декаде рассматриваемого периода меньше, чем по данным реанализа из работ [17, 18]. Это объясняется тем, что в первой декаде периода 1993–2014 гг. обеспеченность измерениями температуры и солёности на гидрологических станциях в глубоководной области моря была существенно выше [3], чем во второй декаде. В соответствии с этим точность воспроизведения псевдоизмерений температуры и солёности в этой области моря также оказалась более высокой. Вторая декада характеризуется ограниченными данными измерений термохалинных параметров на отдельных гидрологических станциях и буями-профилемерами *Argo*. На рис. 3 видно, что в этой декаде значения СКО уровня моря в нашем реанализе несколько увеличились. Их экстремальные значения сопоставимы с СКО уровня моря из реанализа работ [17, 18]. Различия между значениями СКО полей уровня в рассматриваемых реанализах могут быть обусловлены также тем, что в них используются разные методики ассимиляции альтиметрического уровня моря в модели. Расположение основных структур в уровне моря (западный и восточный циклонические круговороты, циклонические и антициклонические вихри) в нашем реанализе и в альтиметрическом уровне, восстановленном на каждые сутки по данным об аномалиях уровня *AVISO* [19], близкое, поскольку псевдоизмерения температуры и солёности привязаны к альтиметрическому уровню [3, 4]. Расположение указанных структур уровня в реанализе полей моря, выполненном в работах [17, 18], может несколько отличаться от расположения структур в альтиметрическом уровне. Отметим, что при этом в отличие от нашей методики в работе [17] применялся более точный алгоритм ассимиляции, основанный на использовании потрековых значений аномалий альтиметрического уровня моря. В нашем случае мы используем при ассимиляции карты *AVISO*. При построении этих карт проводилась интерполяция альтиметрических наблюдений, что вносит дополнительные погрешности.



**Р и с. 3.** Сезонная и межгодовая изменчивость SKO восстановленного уровня моря (относительно альтиметрического)

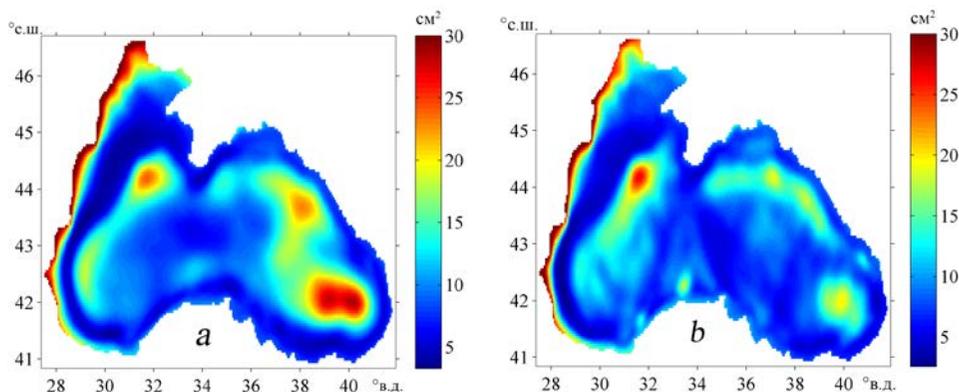
**F i g. 3.** Seasonal and inter-annual variability of root-mean-square deviations of the reconstructed sea level (relative to the altimetry one)

Важный вывод из анализа результатов сопоставления сезонной, межгодовой и декадной изменчивости SKO уровня моря в двух реанализах состоит в том, что ход обеих кривых SKO в основном одинаковый. Экстремальные значения SKO уровня моря в реанализе за 1993–2014 гг., который выполнен с ассимиляцией трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солёности в модели методом адаптивной статистики, во второй декаде периода несколько выше, чем в первой.

### Долговременная синоптическая изменчивость бассейна

Исследованию изменчивости синоптических вихревых образований в Черном море по данным многолетнего гидрологического массива и синхронных гидрологических съемок посвящена большая глава в работе [20]. В ней, в частности, в качестве характеристики синоптической изменчивости анализировалось пространственное распределение средних квадратических отклонений температуры и солёности в различных слоях моря. Аналогичным образом представление о синоптической изменчивости полей течений, температуры и солёности в Черном море за 1993–2014 гг. можно получить, исследуя важнейшую двумерную гидродинамическую функцию – уровень моря, так как производные уровня характеризуют геострофические поверхностные течения в море. Кроме того, в первом приближении уровень моря вычисляется как интеграл от поверхности до дна от аномалии плотности (температуры и солёности) морской воды.

Остановимся на анализе интегральной дисперсии уровня моря, рассчитанной по данным нашего реанализа следующим образом. Средний уровень моря в каждой точке сеточной области рассчитывался как сумма среднесуточных значений уровня за 1993–2014 гг., деленная на количество суток. Затем обычным образом рассчитывалась интегральная дисперсия колебаний уровня в этих же точках. Карты интегральной дисперсии уровня моря (рис. 4) дают представление о характере распределения синоптических структур.



**Р и с. 4.** Дисперсия ( $\text{cm}^2$ ) уровня моря: *a* – по данным реанализа, выполненного методом адаптивной статистики; *b* – по данным реанализа работ [17, 18]

**F i g. 4.** Dispersion ( $\text{cm}^2$ ) of the sea level: *a* – based on the data of the reanalysis performed by the adaptive statistics method; *b* – based on the reanalyses in [17, 18]

Согласно рис. 4, *a*, повышенная синоптическая изменчивость поля уровня, а следовательно и полей течений, температуры и солёности в 1993–2014 гг., наблюдается в двух довольно обширных областях глубоководной части Черного моря – западной и восточной и в локальной зоне севернее Синопа. В западной области синоптическая изменчивость обусловлена динамикой Севастопольского антициклонического вихря, причем в ней выделяются две локальные подобласти повышенных значений интегральной дисперсии уровня моря. Первая из них находится в зоне генерации Севастопольского антициклона (значение дисперсии больше  $20 \text{ cm}^2$ ), вторая – в юго-западной зоне западного циклонического круговорота вод (значение дисперсии больше  $15 \text{ cm}^2$ ). Довольно часто в этой зоне формируется дипольная структура вихрей циклон – антициклон, обнаруженная благодаря использованию в нашем реанализе метода адаптивной статистики [5]. В локальной глубоководной зоне севернее Синопа максимальное значение дисперсии составляет порядка  $15 \text{ cm}^2$ .

Синоптическая изменчивость в восточной более обширной области вызвана движением и эволюцией кавказских антициклонических вихрей (значение дисперсии  $20 \text{ cm}^2$ ) и в большей степени – динамикой и эволюцией Батумского антициклона (значение дисперсии  $25 \text{ cm}^2$ ). Обращает на себя внимание существенно повышенная интегральная дисперсия уровня моря вдоль северного, северо-западного, западного и юго-западного побережий и мористее (рис. 4, *a*), обусловленная, по-видимому, волновыми процессами в море. Отметим работу [21], в которой представлены результаты регионального оперативного прогноза циркуляции вод в восточной части Черного моря по модели с пространственным разрешением 1 км. Полученные в нашем расчете особенности синоптической изменчивости в юго-восточной области моря подтверждаются данными работы [21].

Относительно небольшие значения интегральной дисперсии ( $5 \text{ cm}^2$ ) видны вдоль северо-западного, западного и юго-западного свала глубин моря, а также возле Южного берега Крыма и в зоне Кизилирмакского и Синопского антициклонов. Вдоль Анатолийского побережья также проявляется довольно

слабая синоптическая изменчивость. Представленное на рис. 4, *a* распределение интегральной дисперсии можно сравнить с построенной в работе [22] аналогичной картой дисперсии, созданной по данным альтиметрических наблюдений. Повышенные значения СКО уровня моря, обусловленные динамикой Севастопольского антициклонического вихря, как и в нашем расчете, наблюдаются в западной части бассейна, а также вдоль Основного Черноморского течения (ОЧТ). Сходные области повышенной синоптической изменчивости полей течений, температуры и солёности получены также по данным реанализа за 1992–2015 гг. из работ [17, 18] (рис. 4, *b*). Яркие примеры полей уровня Черного моря в разные даты 2006 г., демонстрирующие мандрирование ОЧТ, образование синоптических и мезомасштабных вихрей справа от него и обуславливающие описанное выше распределение дисперсии уровня, приведены в работе [23] по результатам расчета по модели МГИ с пространственным разрешением 1,64 км.

### Заключение

Исследование полей температуры, солёности и уровня Черного моря выполнено по данным их эволюции в ретроспективном анализе гидрофизических полей за 1993–2014 гг., проведенном с использованием ассимиляции трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солёности в модели МГИ в слое 63–500 м методом адаптивной статистики. Для сопоставления привлекались поля температуры и солёности по данным реанализа за 1993–2012 гг. из работы [2], а также поля уровня моря по данным реанализа за 1992–2015 гг. из работ [17, 18] и по данным чисто прогностического расчета за 1993–2012 гг.

Выполненное исследование показывает, что посредством ассимиляции псевдоизмерений температуры и солёности в модели методом адаптивной статистики удастся воспроизвести реалистичную изменчивость термохалинных характеристик в главном пикноклине. Выявлено, что значения СКО уровня моря по данным нашего расчета в первой декаде рассматриваемого периода (когда имелось больше наблюдений профилей температуры и солёности, чем во второй декаде) меньше, чем по данным реанализа из работ [17, 18]. Это указывает на повышение точности воспроизведения трехмерных полей температуры и солёности по данным альтиметрии по мере увеличения обучающей выборки. Особенности сезонной, межгодовой и декадной изменчивости СКО уровня моря, полученные по данным реанализа с ассимиляцией псевдоизмерений методом адаптивной статистики и по данным реанализа из работ [17, 18], почти одинаковые. Экстремальные значения СКО уровня моря в реанализе за 1993–2014 гг. несколько выше во второй декаде периода, что обусловлено более низкой обеспеченностью измерениями температуры и солёности буями *Argo*.

Исследование пространственной структуры интегральной дисперсии поля уровня моря, рассчитанной по данным реанализа за 1993–2014 гг. и реанализа за 1992–2015 гг. из работ [17, 18], позволяет судить о характере синоптической изменчивости полей течений, температуры и солёности в Черном море. Интенсивность синоптической изменчивости этих полей в нашем реанализе несколько ниже, чем в реанализе работ [17, 18], поскольку в этих ра-

ботах ассимилировались альтиметрический уровень и температура поверхности моря для коррекции динамики и термодинамики верхнего 50-метрового слоя. Интегральная дисперсия уровня моря, полученная по данным нашего реанализа, качественно близка к рассчитанной по данным реанализа из работ [17, 18] и по данным альтиметрических наблюдений из работы [22].

Оригинальная методика ассимиляции трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености в вихререзающей модели циркуляции на основе алгоритма адаптивной статистики, дополненная усвоением температуры поверхности и альтиметрического уровня моря в верхнем слое, позволит в дальнейшем с наилучшей точностью воспроизвести эволюцию гидрологических полей Черного моря.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коротаев Г. К., Лишаев П. Н., Кныш В. В.* Методика анализа данных измерений температуры и солености Черного моря с использованием динамического альтиметрического уровня // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 2. С. 26–42.
2. Reanalysis of seasonal and interannual variability of Black Sea fields for 1993–2012 / G. K. Korotaev [et al.] // *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*. 2016. Vol. 52, no. 4. P. 418–430. doi:10.1134/S0001433816040071
3. *Korotaev G. K., Lishaev P. N., Knysh V. V.* Reconstruction of the three-dimensional salinity and temperature fields of the Black Sea on the basis of satellite altimetry measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics*. 2016. Vol. 52, no. 9. P. 961–973. doi:10.1134/S0001433816090152
4. *Кныш В. В., Лишаев П. Н.* Уточнение методики восстановления трехмерных полей солености и температуры Черного моря по редким измерениям и альтиметрии // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 6. С. 5–17.
5. Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солености в модели / Г. К. Коротаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. № 1. С. 40–56. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-40-56
6. *Evensen G.* The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation // *Ocean Dynamics*. 2003. Vol. 53, iss. 4. P. 343–367. doi:10.1007/s10236-003-0036-9
7. *Беляев К. П., Танажюра К. А. С., Тучкова Н. П.* Сравнение методов усвоения данных буев “АРГО” в гидродинамической модели океана // *Океанология*. 2012. Т. 52, № 5. С. 643–653. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17928237> (дата обращения: 03.12.2017).
8. *Кауркин М. Н., Ибраев Р. А., Беляев К. П.* Усвоение данных ARGO в модели динамики океана с высоким разрешением по методу ансамблевой оптимальной интерполяции (EnOI) // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 6. С. 852–860. doi:10.7868/s0030157416060058
9. *Gejadze I. Yu., Le Dimet F.-X., Shutyayev V.* On analysis error covariances in variational data assimilation // *SIAM Journal on Scientific Computing*. 2008. Vol. 30, iss. 4. P. 1847–1874. doi:10.1137/07068744X
10. *Залесный В. Б., Гусев А. В., Мошонкин С. Н.* Численная модель гидродинамики Черного и Азовского морей с вариационной инициализацией температуры и солености // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 699–716. doi:10.7868/S000235151306014X
11. *Агошков В. И., Пармузин Е. И., Шутяев В. П.* Ассимиляция данных наблюдений в задаче циркуляции Черного моря и анализ чувствительности ее решения // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 6. С. 643–654. doi:10.7868/S0002351513060023
12. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2: Черное море / Ю. П. Ильин [и др.]. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. 421 с.

13. Демьшев С. Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 137–149.
14. Pacanowski R. C., Philander S. G. H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of tropical oceans // Journal of Physical Oceanography. 1981. Vol. 11. P. 1443–1451. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2) (дата обращения: 03.12.2017).
15. Лишаев П. Н. Реанализ гидрофизических полей Черного моря в 1980 – 1993 гг. с ассимиляцией среднегодовых и среднемесячных профилей солености и температуры // Современное состояние и перспективы наращивания морского ресурсного потенциала юга России: тез. докладов междунар. научн. конф., пгт Кацивели, 15–18 сентября 2014 г. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. С. 186–188.
16. The ERA-Interim archive Version 1.0 / P. Berrisford [et al.] // ERA Report Series. No. 1. – ECMWF, 2009. 16 p. URL: <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2009/8173-era-interim-archive.pdf> (дата обращения: 03.12.2017).
17. Дорофеев В. Л., Сухих Л. И. Некоторые тенденции долговременной изменчивости гидрофизических полей Черного моря по результатам реанализа // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2017. Вып. 1. С. 15–22.
18. Дорофеев В. Л., Сухих Л. И. Изучение долговременной изменчивости динамики Черного моря на основе ассимиляции дистанционных измерений в модели циркуляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 2. С. 254–264. doi:10.7868/S000235151702002X
19. AVISO+ – Satellite Altimetry Data: [сайт]. URL: <http://www.aviso.oceanobs.com/> (дата обращения 05.12.2017).
20. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.]. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 239 с.
21. Кордадзе А. А., Деметрашвили Д. И. Региональная оперативная система прогноза состояния восточной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 25, т. 2. С. 136–146.
22. Korotaev G. K., Saenko O. A., Koblinsky C. J. Satellite altimetry observations of the Black Sea level // Journal of Geophysical Research. 2001. Vol. 106, no. C1. P. 917–933.
23. Демьшев С. Г., Дымова О. А. Моделирование циркуляции Черного моря с высоким пространственным разрешением // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 25, т. 2. С. 114–135.

*Об авторах:*

**Лишаев Павел Николаевич**, младший научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **Scopus AuthorID: 57193071072**, pavellish@mail.ru

**Кныш Василий Васильевич**, ведущий научный сотрудник, отдел динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: B-3603-2018**, vaknysh@yandex.ru

**Коротаев Геннадий Константинович**, научный руководитель ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: K-3408-2017**, gkorotaev@gmail.com