

## Влияние сезонной изменчивости завихренности ветра на структуру циркуляции в Черном море

А. А. Павлушин\*, Н. Б. Шапиро, Э. Н. Михайлова

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*E-mail: pavlushin@mhi-ras.ru*

Поступила в редакцию 21.03.2018 г., после доработки 15.05.2018 г.

Приводятся результаты двух экспериментов по численному моделированию крупномасштабной циркуляции и вихревых структур в Черном море при воздействии сезонно меняющегося ветра в рамках двухслойной вихреразрешающей модели. В модели учитывается реальный рельеф дна, для возбуждения движения используется только поле касательного напряжения ветра с отличной от нуля завихренностью. Сток энергии осуществляется за счет придонного трения, трения на поверхности раздела слоев и горизонтальной турбулентной вязкости. В одном из рассматриваемых экспериментов завихренность касательного напряжения ветра меняет знак в зависимости от сезона (зимой она циклоническая, летом антициклоническая), но остается постоянной по пространству. В другом эксперименте поле тангенциального напряжения ветра задается в соответствии с современными представлениями о его пространственной изменчивости таким образом, что над западной половиной моря располагается область антициклонической завихренности, площадь и интенсивность которой меняется в течение года. В обоих случаях в море происходит периодическое разделение циркуляции на два отдельных круговорота – «очки Книповича». Однако напряжение ветра с однородной по пространству завихренностью вследствие западной интенсификации течений, вызванной влиянием  $\beta$ -эффекта, приводит к формированию в юго-западной части бассейна циклонического круговорота большой интенсивности. В другом эксперименте, учитывающем пространственную неравномерность завихренности напряжения ветра над морем, а именно антициклоническую завихренность касательного напряжения ветра над его западной частью, полученная циркуляция вполне соответствует данным наблюдений.

**Ключевые слова:** Черное море, вихреразрешающая модель, крупномасштабная циркуляция, завихренность напряжения ветра, сезонная изменчивость, «очки Книповича».

**Благодарности.** Работа выполнена 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»).

**Для цитирования:** Павлушин А. А., Шапиро Н. Б., Михайлова Э. Н. Влияние сезонной изменчивости завихренности ветра на структуру циркуляции в Черном море // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 5. С. 373–388. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-373-388

## Influence of Seasonal Variability of the Wind Stress Vorticity on the Structure of the Black Sea Circulation

A. A. Pavlushin\*, N. B. Shapiro, E. N. Mikhailova

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

*\*e-mail: pavlushin@mhi-ras.ru*

Represented are the results of two experiments on numerical modeling (within the framework of the two-layer eddy-resolving model) of the Black Sea large-scale circulation under the influence of the seasonally-variable wind. The actual bottom topography is taken into account in the model. The motion is excited only by the tangential wind stress with a non-zero vorticity. The energy loss is due to the bottom friction, the friction at the layers' interface and the horizontal turbulent viscosity. In one of the experiments under consideration, the wind stress vorticity

© Павлушин А. А., Шапиро Н. Б., Михайлова Э. Н., 2018

changes its sign depending on the season (in winter it is cyclonic, in summer – anticyclonic), but remains constant in space. In the other experiment, the field of the tangential wind stress is preset (according to the modern notions on its spatial variability) in such a way that over the sea western half there is the zone of anticyclonic vorticity, the area and intensity of which vary throughout the year. In both cases the circulation in the Black Sea is periodically divided into two large cyclones – the “Knipovich’s glasses”. However due to the western intensification of currents caused by the  $\beta$ -effect, the wind stress with spatially uniform vorticity results in formation of a cyclonic cycle of extremely high intensity in the southwestern part of the basin. In the other experiment that takes into account spatial variability of the wind stress vorticity above the sea, namely, anticyclonic vorticity of the wind tangential stress over the basin western part, the obtained circulation quite corresponds to the observational data.

**Keywords:** Black Sea, eddy-resolving model, large-scale circulation, wind stress vorticity, seasonal variability, “Knipovich's glasses”.

**Acknowledgments:** the investigation is carried out within the framework of the state task on theme № 0827-2014-0011 “Studies of regularities of the marine environment state changes based on the operational observations and the data of the nowcast, forecast and reanalysis system of the marine areas state” (code “Operational oceanography”).

**For citation:** Pavlushin, A.A., Shapiro, N.B. and Mikhailova, E.N., 2018. Influence of Seasonal Variability of the Wind Stress Vorticity on the Structure of the Black Sea Circulation. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(5), pp. 373-388. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-373-388 (in Russian).

## Введение

В продолжение серии работ по исследованию влияния отдельных факторов на формирование и изменчивость крупномасштабной циркуляции и вихревых структур в Черном море, вызванных воздействием ветра, были проведены численные эксперименты, результаты которых обсуждаются в данной статье. Напомним, что для численного моделирования используется двухслойная вихререзающая модель, основанная на примитивных уравнениях гидродинамики океана. В модели рассматривается морской бассейн, состоящий из двух слоев воды различной плотности, которые не смешиваются между собой. Движение воды в море возбуждается только воздействием касательного напряжения ветра, сток энергии осуществляется за счет горизонтальной турбулентной вязкости, придонного трения и трения между слоями на границе их раздела. Более подробное описание модели имеется в работах [1, 2].

Как было показано [2, 3], необходимым условием для формирования известной по наблюдениям циркуляции в Черном море, является обязательный учет в модели таких факторов, как долговременное воздействие ветра с циклонической завихренностью, нелинейность, плотностная стратификация (двухслойность),  $\beta$ -эффект, рельеф дна. При этом коэффициенты горизонтальной вязкости, трения на дне и между слоями должны быть заданы достаточно малыми, чтобы не препятствовать процессам гидродинамической неустойчивости, приводящим к вихреобразованию. В предыдущих экспериментах под влиянием стационарного ветра и вышеперечисленных факторов были получены характерные особенности черноморской циркуляции, такие как струйное меандрирующее течение, расположенное над свалом глубин, – Основное Черноморское течение (ОЧТ), мезомасштабные квазистационарные антициклонические вихри, возникающие между ОЧТ и берегом (Батумский, Севастопольский и др.) [4–7]. Меандры ОЧТ представляли собой длинные волны, распространяющиеся вдоль стрежня потока с фазовой скоростью 5–10 см/с, вместе с ними перемещались и мезомасштабные вихри.

Отметим, что в экспериментах со стационарным ветром нам не удалось воспроизвести хорошо известный феномен черноморской циркуляции – ее

разделение на два отдельных замкнутых круговорота. Такая схема течений Черного моря называется «очками Книповича» и была многократно подтверждена в работах различных авторов на основании анализа осредненных полей динамической топографии [4, 5, 8].

Во всех проведенных ранее экспериментах в качестве возбуждающей силы нами использовалось поле касательного напряжения ветра  $\tau(x, y)$  с циклонической завихренностью ( $\text{rot } \tau > 0$ ), которая не менялась по времени и была постоянной над всей поверхностью моря. В действительности завихренность ветра над Черным морем в течение года не остается постоянной и даже меняет знак в летние месяцы [9, 10]. Кроме того, завихренность  $\tau$  является неравномерной по пространству [11, 12], что также может влиять на структуру течений в море.

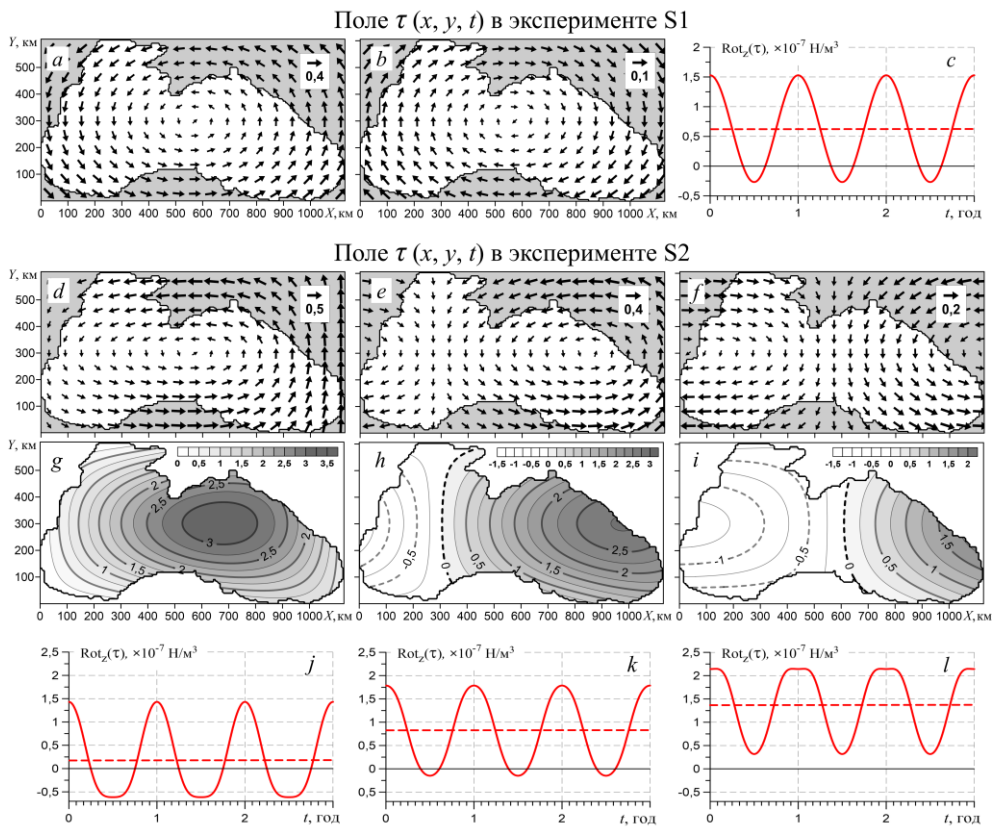
### Численные эксперименты

В данной работе анализируются результаты двух экспериментов S1 и S2, в которых, в отличие от предыдущих расчетов, для атмосферного форсинга используется поле  $\tau(x, y, t)$ , меняющееся в течение года. Глубина залегания поверхности раздела в начальный момент времени в состоянии покоя составляет 175 м, коэффициенты  $r_2, r_3$  в выражении для придонного трения [ $r_2 + r_3|\mathbf{u}_2|$ ] $\mathbf{u}_2$  равны  $1 \cdot 10^{-3}$  и  $2 \cdot 10^{-3}$  см/с соответственно, коэффициент бигармонической вязкости  $A_B = 4 \cdot 10^{16}$  см<sup>4</sup>/с<sup>4</sup>. Коэффициент  $r_1$  для трения между слоями  $r_1(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2)$  принимается равным  $2 \cdot 10^{-4}$  см/с.

В эксперименте S1 завихренность поля  $\tau$  задается постоянной по пространству, но меняется во времени по гармоническому закону. В течение девяти месяцев над морем существует циклоническая завихренность касательного напряжения ветра с максимумом в начале января, а летом знак  $\text{rot } \tau$  меняется на противоположный (рис. 1, *a – c*). Максимум антициклонической завихренности ветра приходится на 1 июля.

В эксперименте S2 в поле  $\tau(x, y, t)$  были учтены особенности распределения и изменчивости завихренности ветра над Черным морем, описанные в работе В. В. Ефимова, А. В. Юровского [11]. Авторы показали, что между восточной и западной частями Черного моря имеются существенные различия в сезонном ходе  $\text{rot } \tau$ . В восточной половине моря на протяжении всего года соблюдается циклонический режим завихренности ветра с максимумом в зимние месяцы. Над западной частью моря в течение большей части года завихренность ветра антициклоническая, а циклоническая возникает только зимой. Указанные особенности, по мнению авторов и других исследователей [13, 14], связаны с влиянием на завихренность ветра в нижней части тропосферы муссонного механизма и прибрежной орографии. При моделировании поля  $\tau(x, y, t)$  также были приняты во внимание данные о средних и максимальных значениях  $\text{rot } \tau$  из работы [10].

Поля  $\tau$ , использованные в эксперименте S2, и соответствующие им распределения  $\text{rot } \tau$  для трех моментов времени приведены на рис 1, *d – i*. Осредненная по всей площади моря завихренность  $\tau$  имеет циклоническую направленность в осенние, зимние и весенние месяцы (рис. 1, *k*). Над восточной половиной моря в течение всего года завихренность  $\tau$  циклоническая  $\text{rot } \tau > 0$  (рис. 1, *j*), а над его западной половиной знак  $\text{rot } \tau$  меняется в зависимости от сезона: в холодную половину года  $\text{rot } \tau > 0$ , в теплую –  $\text{rot } \tau < 0$ .



**Рис. 1.** Мгновенные поля  $\tau$ ,  $\text{см}^2/\text{с}^2$ , в эксперименте S1: 1 января (a), 1 июля (b); в эксперименте S2: 1 января (d), 1 апреля и 1 октября (e), 1 июля (f). В правом верхнем углу приведен масштаб  $\tau$ . Мгновенные поля  $\text{rot } \tau$ ,  $10^7 \text{ Н/м}^3$ , в эксперименте S2: 1 января (g), 1 апреля и 1 октября (h), 1 июля (i). Изменение во времени  $\text{rot } \tau$  в S1 (c); изменение во времени среднего  $\text{rot } \tau$  в S2: по всему морю (k), для западной половины  $x < 500 \text{ км}$  (j), для восточной половины моря  $x \geq 500 \text{ км}$  (l). Пунктирные линии на c, j, k, l – среднегодовая завихренность  $\text{rot } \tau$

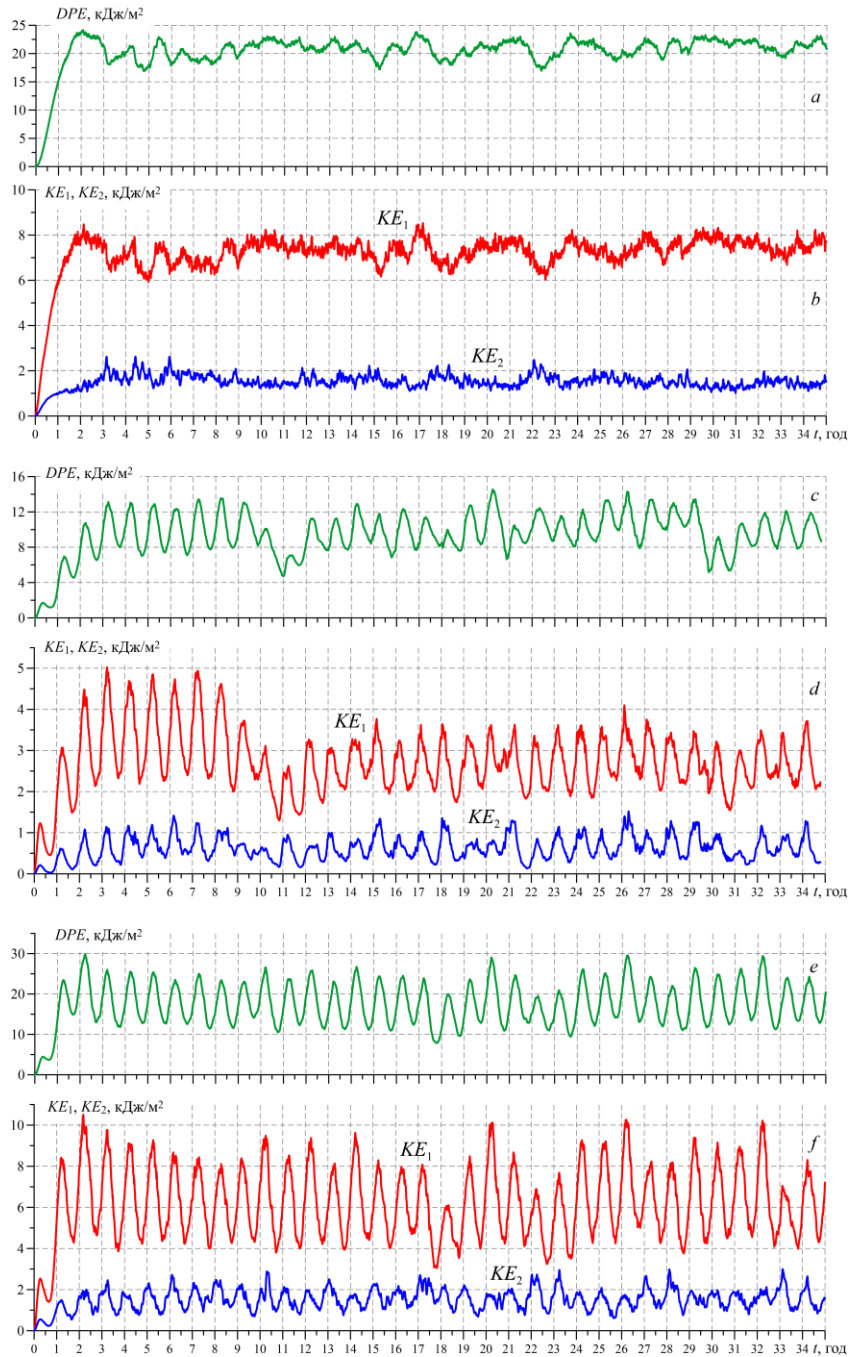
**Fig. 1.** Instantaneous fields  $\tau$ ,  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , in the experiment S1: January, 1 (a), July, 1 (b); in the experiment S2: January, 1 (d), April, 1 and October, 1 (e), July, 1 (f). The scale of  $\tau$  is in the upper right corner. Instantaneous fields  $\text{rot } \tau$ ,  $10^7 \text{ N/m}^3$ , in the experiment S1: January, 1 (g), April, 1 and October, 1 (h), July, 1 (i). Variation in time of  $\text{rot } \tau$  in S1 (c), variation in time of average  $\text{rot } \tau$  in S2 over the whole sea (k); for the western half of the sea  $x < 500 \text{ km}$  (j), for the eastern half of the sea  $x \geq 500 \text{ km}$  (l). The dotted lines on c, j, k, l denote annual average vorticity of  $\text{rot } \tau$

Численное интегрирование на длительный срок осуществляется из состояния покоя с шагом по времени  $\Delta t = 90 \text{ с}$ , шагами по пространству  $\Delta x = \Delta y = 3 \text{ км}$ . В ходе экспериментов для контроля выхода решения на статистически-равновесный режим используются средние по площади значения доступной потенциальной  $DPE$  и кинетической энергии в каждом слое  $KE_1, KE_2$ .

$$DPE = \langle \rho_1 g' (h_1^2 - h_0^2) / 2 \rangle, \quad KE_1 = \langle \rho_1 h_1 (u_1^2 + v_1^2) / 2 \rangle, \quad KE_2 = \langle \rho_2 h_2 (u_2^2 + v_2^2) / 2 \rangle,$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – плотность воды в слоях;  $h_0$  – толщина верхнего слоя в состоянии покоя;  $h_1, h_2$  – толщина верхнего и нижнего слоев соответственно;  $u_1, v_1$  – со-

ставляющие скорости в верхнем слое;  $u_2, v_2$  – составляющие скорости в нижнем слое; угловые скобки означают осреднение по площади.



**Рис. 2.** Графики осредненной по площади энергии в эксперименте со стационарным ветром  $\tau$  (a, b) и с сезонным ходом в экспериментах S1 (c, d) и S2 (e, f)

**Fig. 2.** Graphs of the square-averaged energy in the experiment with the stationary wind  $\tau$  (a, b) and the seasonal variation in the experiments S1 (c, d) and S2 (e, f)

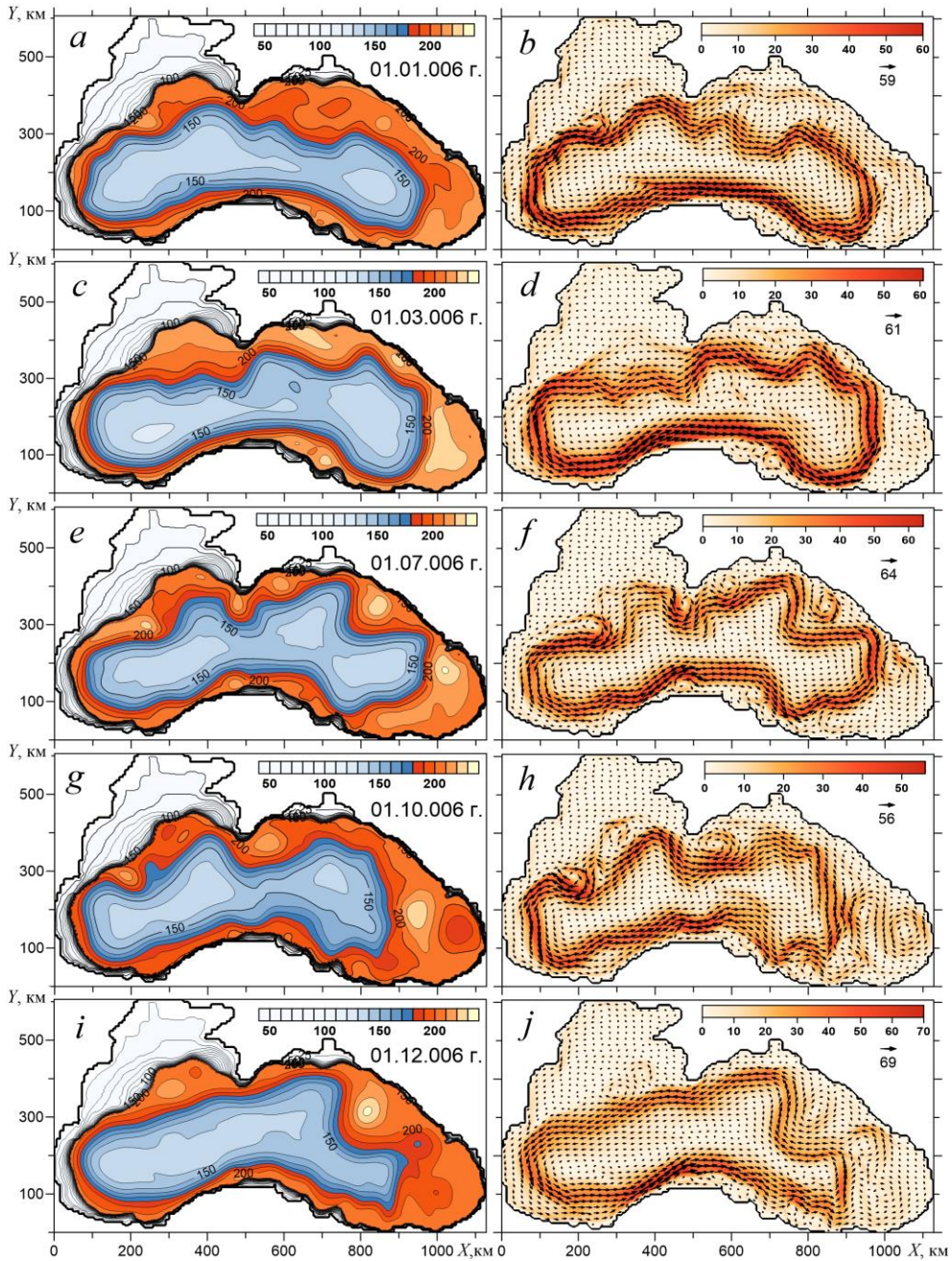
Изменения во времени  $DPE$ ,  $KE_1$ ,  $KE_2$  имеют свои отличительные особенности в каждом эксперименте, при этом в их временном ходе можно выделить несколько характерных периодов. В начальном периоде (*spin-up*) происходит накопление энергии и формирование течений. В предыдущих экспериментах со стационарным ветром [2] этот период заканчивался, когда скорости течения достигали значений, при которых начинали проявляться нелинейные эффекты, приводившие к возникновению гидродинамической неустойчивости и образованию мезомасштабных вихрей. При этом резко уменьшался приток энергии в море от ветра, что, в свою очередь, приводило к уменьшению  $DPE$  и  $KE_1$ .

После *spin-up* наступает период, в течение которого происходит взаимная адаптация полей течений в различных слоях между собой и с полем  $\tau$ . Характерной его особенностью является формирование циркуляции в нижнем слое, сопровождающееся ростом  $KE_2$ . В конце периода адаптации решение выходит на режим статистического равновесия, при котором средние характеристики, рассчитываемые в модели, остаются практически постоянными при дальнейшем интегрировании по времени. Отметим, что в экспериментах со стационарным ветром указанные периоды хорошо выделяются. На рис. 2, *a*, *b* приведены графики  $DPE$ ,  $KE_1$ ,  $KE_2$ , полученные при воздействии стационарного поля  $\tau$ , имеющего постоянную циклоническую завихренность  $\text{rot } \tau = 1,53 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^3$ . Видно, что период *spin-up* составляет два года, а к началу четвертого года решение выходит на статистически равновесный режим. В этом режиме в эксперименте со стационарным ветром на графиках энергии наблюдаются длинноволновые колебания двух видов (рис. 2): с периодом около 50 сут, обусловленные образованием мезомасштабных вихрей при мандрировании струйного кругового течения в верхнем слое, и со значительно большим периодом от одного до двух лет, связанные с динамическими процессами в нижнем слое, более инерционном вследствие его значительной толщины [2].

### Результаты численных экспериментов S1 и S2

В отличие от экспериментов с постоянным  $\text{rot } \tau$ , в которых изменение энергии определялось автоколебательными процессами, в экспериментах S1, S2 низкочастотная изменчивость характеристик модели задается извне сезонным ходом завихренности ветра. Это приводит к тому, что на графиках энергетических характеристик (рис. 2, *c* – *f*) труднее определить границы между периодами *spin-up*, адаптации и статистического равновесия. Дело в том, что на фоне больших по амплитуде сезонных колебаний этих величин изменчивость, связанная с процессами мезомасштабного вихреобразования, видна хуже, чем в эксперименте с постоянным  $\text{rot } \tau$ . Судя по графикам  $KE_2$ , можно сказать, что в экспериментах S1 и S2 период *spin-up* продолжается два года, после чего решение в эксперименте S2 практически сразу выходит на статистически равновесный режим, а в эксперименте S1 период статистического равновесия наступает только после 12-го года. Такой вывод следует из анализа изменчивости  $KE_1$  (рис. 2, *d*).





**Рис. 3.** Мгновенные поля в эксперименте S1:  $h_1$ , м (a, c, e, g, i),  $u_1$ , см/с (b, d, f, h, j). Даты указаны на картах  $h_1$ ; на картах  $u_1$  масштабная стрелка соответствует максимальной скорости

**Fig. 3.** Instantaneous fields in the experiment S1:  $h_1$ , m (a, c, e, g, i),  $u_1$ , cm/s (b, d, f, h, j). The dates are given on the maps  $h_1$ ; on the maps  $u_1$  the scale arrow corresponds to the maximum velocity

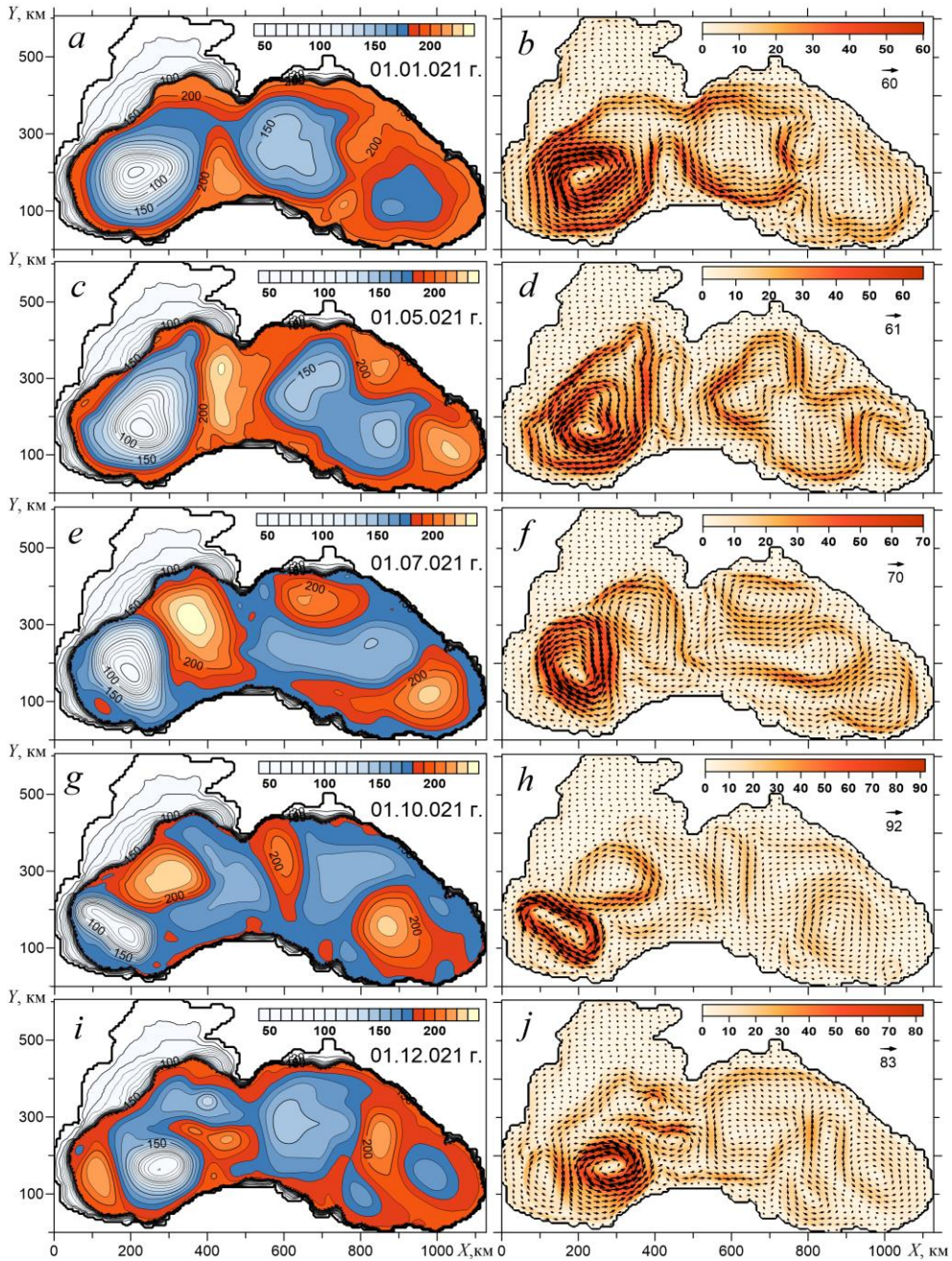
В эксперименте S1 в течение первых восьми лет в бассейне формируется циркуляция, при которой в верхнем слое моря существует круговое струйное

течение (аналог ОЧТ), распространяющееся вдоль материкового склона по всему его периметру. Характерные для этого периода мгновенные поля  $h_1$ ,  $\mathbf{u}_1$ , построенные для нескольких моментов времени в шестом году, приведены на рис. 3. Обращает на себя внимание хорошее соответствие между пространственным распределением толщины верхнего слоя и полем течений в нем. Как видно на рисунке, круговое течение имеет хорошо выраженный меандрирующий характер. Под влиянием сезонной изменчивости завихренности ветра количество и амплитуда меандров увеличиваются в летний период (рис. 3, *e – h*), а поздней осенью и зимой при усилении циклонической завихренности  $\tau$  меандрирование ОЧТ практически прекращается (рис. 3, *a, b, i, j*). Средние скорости течений в верхнем слое в области ОЧТ составляют 40–60 см/с зимой и 35–45 см/с летом. Отметим, что циклонический характер циркуляции в море сохраняется в течение всего года, несмотря на то что летом над морем завихренность напряжения ветра антициклоническая.

В нижнем слое моря в рассматриваемый период времени в результате динамического взаимодействия слоев образуются течения, направленные преимущественно вдоль изобат. Средняя скорость течений составляет 3–5 см/с. В области материкового склона в поле течений генерируются захваченные волны, распространяющиеся, как и течения, в циклоническом направлении. В глубоководной части моря формируются баротропные волны Россби [2, 15, 16], которые способствуют переносу и накоплению циклонической завихренности поля скорости течений в западной половине бассейна. Отметим, что при сезонной изменчивости завихренности ветра процессы волнообразования и передачи энергии в нижний слой моря получаются более интенсивными, чем в экспериментах с постоянной завихренностью. В конечном итоге в эксперименте S1 после девяти лет расчетов это приводит к перестройке поля течений, в результате которой в юго-западной части моря образуется интенсивный циклонический вихрь, а циркуляция в восточной половине бассейна значительно ослабевает. Этот процесс отражается в поведении суммарной энергии, что видно на рис. 2, *c, d*.

В дальнейшем, начиная с 13-го года и до конца расчетов в эксперименте S1, изменение циркуляции в пределах годового цикла происходит однотипно, что свойственно режиму статистического равновесия. Характерные для этого периода мгновенные поля  $h_1$  и  $\mathbf{u}_1$  приведены на рис. 4. Основной особенностью циркуляции в рассматриваемый период является наличие мощного циклонического вихря в верхнем слое моря в его юго-западной части. Этот вихрь сохраняется в течение всего времени и оказывает значительное влияние на поступление энергии от ветра и формирование поля течений. Под его воздействием в зимнее время возле Анатолийского побережья образуется антициклонический круговорот (рис. 4, *a, b*), который способствует разделению общей циркуляции на две части. Антициклонический вихрь не исчезает полностью даже в момент максимального положительного  $\text{rot } \tau$ . При ослаблении циклонической завихренности  $\tau$  и смене ее знака антициклон расширяется и занимает значительную область моря между Турцией и Крымом (рис. 4, *f, g*).





**Рис. 4.** Мгновенные поля в эксперименте S1:  $h_1$ , м (a, c, e, g, i),  $u_1$ , см/с (b, d, f, h, j). Даты указаны на картах  $h_1$ ; на картах  $u_1$  масштабная стрелка соответствует максимальной скорости

**Fig. 4.** Instantaneous fields in the experiment S1:  $h_1$ , m (a, c, e, g, i),  $u_1$ , cm/s (b, d, f, h, j). The dates are given on the maps  $h_1$ ; on the maps  $u_1$  the scale arrow corresponds to the maximum velocity

В восточной половине Черного моря в это время наблюдается еще один циклонический круговорот, более крупный по размеру, но меньший по ин-

тенсивности, чем циклон на юго-западе. Круговорот усиливается в осенне-зимний период и ослабевает летом в полном соответствии с сезонным ходом завихренности  $\tau$  (рис. 4, *f*, *g*). Весной правее этого циклона, у восточного берега моря, происходит формирование антициклонического вихря (Батумского антициклона), который в дальнейшем перемещается от места своего образования в направлении на северо-запад (рис. 4, *c*, *e*, *g*, *i*). Время жизни этого антициклонического образования составляет более полугода, скорость перемещения порядка 2 см/с. Полученные результаты согласуются с данными спутниковых наблюдений за динамикой Батумского антициклона, приведенными в работе [17].

В нижнем слое моря в эксперименте S1 циркуляция в рассматриваемый период представляет собой обширный циклонический круговорот с двумя центрами, соответствующими циклонам верхнего слоя. Осенью и зимой циркуляция в нижнем слое усиливается, летом – ослабевает. Течения распространяются преимущественно вдоль изобат со средней скоростью 2–5 см/с. На них накладываются волны, захваченные материковым склоном, – разнообразность топографических волн Россби [15]. Отметим, что баротропные волны Россби, наблюдавшиеся в эксперименте S1 первые девять лет, в последующие годы не проявляются.

В целом по эксперименту S1 можно сказать, что его результаты оказались несколько неожиданными. В эксперименте очень ярко проявился  $\beta$ -эффект, приведший к образованию интенсивного циклона в юго-западной части моря и ослаблению течений в его восточной половине. Согласно данным наблюдений [4–6], в Черном море подобные особенности в циркуляции не наблюдаются. В работе [18] приводятся данные о большей интенсивности западного круговорота в Черном море, но эта интенсификация не столь значительна, как в эксперименте S1. Дополнительные эксперименты, в которых менялась интенсивность ветра и параметры трения на границах слоев, показали, что во всех случаях, когда завихренность  $\tau$  оставалась постоянной по пространству, циркуляция через определенное время оказывалась подобной циркуляции, полученной в эксперименте S1, при которой в юго-западной области бассейна образовывался интенсивный циклонический круговорот.

Было сделано предположение о том, что причина несоответствия результатов моделирования данным наблюдений может заключаться именно в некорректном задании пространственного распределения завихренности касательного напряжения ветра.

Для подтверждения этой гипотезы был проведен эксперимент S2, в котором, как уже говорилось выше, задавалось касательное напряжение ветра с непостоянной по пространству завихренностью. При этом завихренность ветра менялась по-разному над западной и восточной половинами моря в зависимости от времени года (см. рис. 1, *d–j*). Такое распределение завихренности ветра более соответствует реальным атмосферным условиям над акваторией Черного моря, полученным на основе данных наблюдений и описанным в работах [11, 12].

В эксперименте S2 уже к четвертому году в море формируется циркуляция, общая схема которой в дальнейшем не видоизменяется до окончания расчетов. Как видно на графиках (рис. 2, *c*, *d*),  $DPE$ ,  $KE_1$ ,  $KE_2$  колеблются от-

носителем некоторых средних значений, что характерно для статистически равновесного режима. Переходов от одного режима циркуляции к другому, как в эксперименте S1, не наблюдается, хотя в некоторые годы (18-й, 23-й, 33-й) тенденция к этому имеется. Отметим, что в указанные годы  $DPE$  и  $KE_1$  принимают аномально низкие значения.

Если рассмотреть мгновенные поля  $h_1$ ,  $u_1$  за несколько последовательных моментов времени в течение одного года, то можно увидеть, что схема циркуляции в эксперименте S2 имеет большое сходство с циркуляцией, наблюдавшейся в эксперименте S1 в течение первых девяти лет (см. рис. 3). В верхнем слое моря по всему его периметру располагается интенсивное циклоническое течение (аналог ОЧТ), скорости в котором в зависимости от сезона составляют 60–100 см/с. Максимальные значения скорости отмечаются ранней весной, минимальные – в конце лета. Течение имеет ярко выраженный меандрирующий характер. Интенсивность и амплитуда меандров усиливаются в весенне-летний период, особенно вдоль северной границы моря (рис. 5, *f, g*). Зимой в период максимальной циклонической завихренности ветра меандрирование кругового течения практически прекращается (рис. 5, *a, b*).

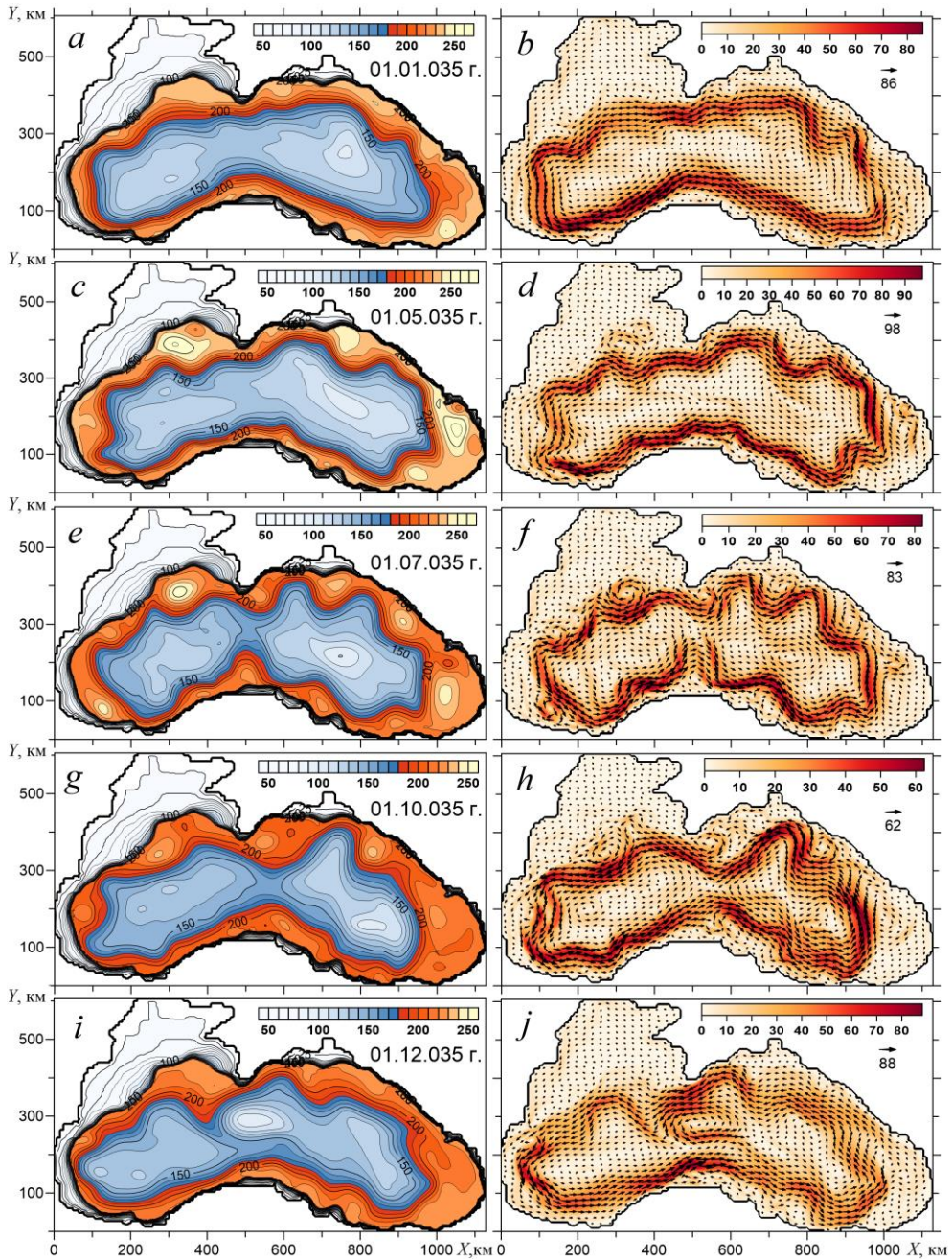
В нижнем слое моря в течение всего эксперимента существует циклоническая циркуляция, в которой на течения, направленные вдоль изобат, накладываются длинноволновые колебания, связанные с распространением захваченных волн в области материкового склона и баротропных волн Россби в глубоководной части бассейна. Напомним, что такие же волновые процессы наблюдались в эксперименте S1 в течение первых девяти лет, но затем циркуляция перестроилась (см. рис. 4.). В эксперименте S2 подобная перестройка циркуляции не происходит, так как избыток циклонической завихренности течений в юго-западной части моря компенсируется в результате воздействия антициклонической завихренности ветра. Другими словами, ветер в западной половине бассейна оказывает тормозящее действие на круговое циклоническое течение, формирующееся под действием преобладающего над морем циклонического  $\text{rot } \tau$ . Это приводит к ослаблению западной интенсификации течений. Роль  $\beta$ -эффекта, проявляющегося в распространении ОЧТ по всему периметру Черного моря, остается такой же, как при воздействии стационарного ветра.

В эксперименте S2 периодически наблюдается разделение кругового течения на два отдельных циклонических круговорота. В некоторых случаях это происходит при встрече и взаимном наложении меандров ОЧТ,двигающихся навстречу друг другу вдоль северного и южного берегов (рис. 6, *a, b*). Чаще всего такое наложение возникает в наиболее узком месте Черного моря между Турцией и Крымом (рис. 6, *c – f*). Вдоль южной границы бассейна крупные меандры формируются реже, чем на севере, в основном летом и ранней осенью. Иногда наложение меандров происходит в нескольких местах одновременно, и тогда в море некоторое время может существовать более двух крупномасштабных круговоротов.

Кроме того, разделение циркуляции на два круговорота в эксперименте S2 происходит при формировании антициклонического вихря в районе Анатолийского побережья (рис. 6, *g – j*). В этом случае разделение циркуляции более устойчиво и продолжительно. Отметим, что такие условия возникают достаточно редко, примерно один раз в 6–7 лет в летние и осенние месяцы.



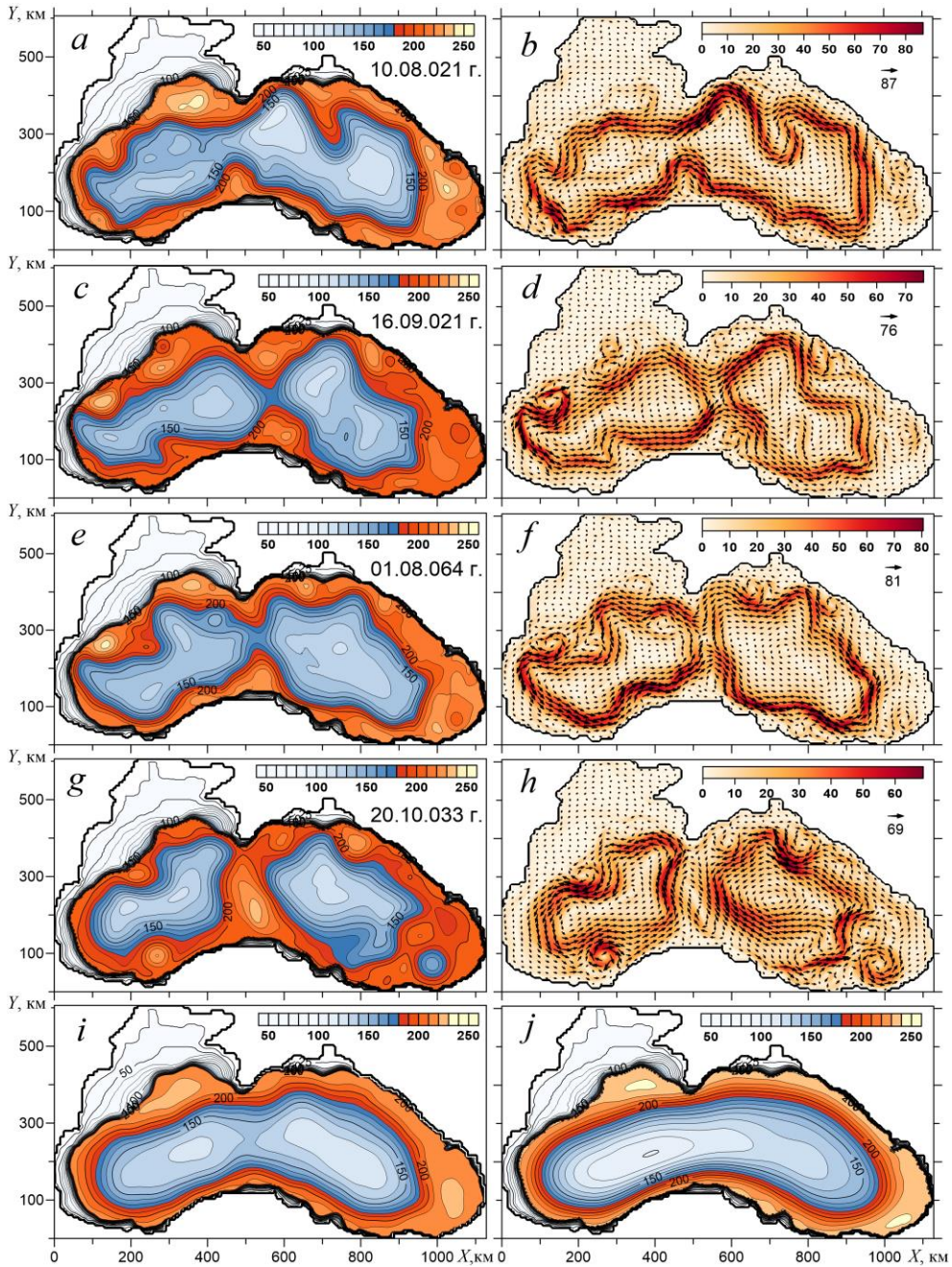
На графиках энергии в эти годы наблюдаются максимальные значения  $DPE$ , что говорит о большем, чем в другие годы, накоплении потенциальной энергии в предшествующую зиму.



**Рис. 5.** Мгновенные поля в эксперименте S2:  $h_1$ , м (a, c, e, g, i),  $u_1$ , см/с (b, d, f, h, j). Даты указаны на картах  $h_1$ ; на картах  $u_1$  масштабная стрелка соответствует максимальной скорости

**Fig. 5.** Instantaneous fields in the experiment S2:  $h_1$ , m (a, c, e, g, i),  $u_1$ , cm/s (b, d, f, h, j). The dates are given on the maps  $h_1$ ; on the maps  $u_1$  the scale arrow corresponds to the maximum velocity





**Рис. 6.** Мгновенные поля в эксперименте S2:  $h_1$ , м (a, c, e, g),  $u_1$ , см/с (b, d, f, h). Среднемесячное поле  $h_1$ , м, за август в эксперименте S2 (i), среднее поле  $h_1$ , м в эксперименте со стационарным ветром (j). Даты указаны на картах  $h_1$ , на картах  $u_1$  масштабная стрелка соответствует максимальной скорости

**Fig. 6.** Instantaneous fields in the experiment S2:  $h_1$ , m (a, c, e, g),  $u_1$ , cm/s (b, d, f, h). Monthly average field  $h_1$ , m, for August in the experiment S2 (i), average field  $h_1$ , m in the experiment with stationary wind (j). The dates are given on the maps  $h_1$ , on the maps  $u_1$  the scale arrow corresponds to the maximum velocity

Похожая картина разделения крупномасштабной циркуляции была получена в работе [19] в прогностическом расчете с ассимиляцией в модели среднегодовых профилей температуры и солености. Кроме того, полученные результаты исследования поведения ОЧТ хорошо согласуются с данными, приведенными в работе [5, стр. 126], где на рис. 4, *a*, приводится карта положения стрежня ОЧТ, построенная по результатам синхронных океанографических съемок для четырех различных лет.

По данным эксперимента S2, нами были рассчитаны среднегодовые месячные поля  $h_1$ . На рис. 6, *i* приведено такое поле, построенное для августа. Отчетливо видны два крупномасштабных циклонических круговорота, расположенных внутри кругового течения, охватывающего все море. Собственно, это и есть классические «очки Книповича». Рядом для сравнения приводится осредненное поле  $h_1$ , полученное в эксперименте со стационарным ветром (рис. 6, *j*).

### **Заключение**

Как видно из результатов проведенных численных экспериментов, существенное влияние на формирование крупномасштабной циркуляции в Черном море оказывает пространственно-временная изменчивость завихренности касательного напряжения ветра. Это объясняет необходимость корректного учета ветрового воздействия при моделировании крупномасштабных процессов в Черном море.

В эксперименте S1 (без учета пространственных особенностей распределения  $\text{rot } \tau$ ) полученная картина течений не вполне соответствует известной схеме черноморской циркуляции, но этот эксперимент показывает, каким образом атмосферные условия над морем могут влиять на особенности крупномасштабных течений. Сопоставление экспериментов S1 и S2 дает возможность объяснить механизм образования двух близких по интенсивности и структуре суббассейновых круговоротов – «очков Книповича».

При использовании ветра с постоянной по пространству завихренностью (эксперимент S1) разделение циркуляции на два круговорота происходит, однако называть эти круговороты «очками Книповича» не совсем правильно из-за чрезвычайно интенсивного циклонического круговорота в юго-западной части бассейна, который, по сути, представляет собой западный пограничный слой в Черном море.

Преобладание антициклонической завихренности напряжения ветра в юго-западной части моря (эксперимент S2) приводит фактически к сглаживанию «западного пограничного слоя» и к качественному изменению структуры циркуляции, а именно к появлению двух близких по интенсивности суббассейновых круговоротов, вполне напоминающих «очки Книповича». Подчеркнем, что преобладание антициклонической завихренности ветра в западной части Черного моря является фактом, который был установлен на основе анализа данных наблюдений [9, 11, 12].

Существуют различные мнения о влиянии  $\beta$ -эффекта на формирование крупномасштабной циркуляции в Черном море. На основании полученных нами результатов можно утверждать, что его роль велика. Как было показано



в работе [2], и новые эксперименты S1 и S2 это подтвердили, волны Россби, образующиеся вследствие  $\beta$ -эффекта и нелинейности, способствуют распространению кругового течения (ОЧТ) над свалом глубин по всему периметру Черного моря.

Отсутствие выраженной западной интенсификации течений в Черном море объясняется пространственным распределением поля ветра, при котором усиление течений у западного берега, возникающее вследствие  $\beta$ -эффекта, компенсируется влиянием антициклонической завихренности  $\text{rot } \tau$  в этом районе моря в весенний, летний и осенний период.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двухслойная вихререзающая модель ветровых течений в Черном море / А. А. Павлушин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 5. С. 3–22. doi:10.22449/0233-7584-2015-5-3-22
2. Павлушин А. А., Шапиро Н. Б., Михайлова Э. Н. Роль рельефа дна и  $\beta$ -эффекта в динамике Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 27–39. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-27-39
3. Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика Черного моря под ветровым воздействием / А. Г. Зацепин [и др.] // Современные проблемы динамики океана и атмосферы: сб. статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П. С. Линейкина / Под ред. А. В. Фролова, Ю. Д. Реснянского. М. : Триада ЛТД, 2010. С. 347–368.
4. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
5. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов [и др.]. Л. : Гидрометеониздат, 1984. 239 с.
6. Seasonal, interannual, and mesoscale variability of the Black Sea upper layer circulation derived from altimeter data / G. Korotaev [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2003. Vol. 108, iss. C4. 3122. doi:10.1029/2002JC001508
7. Stanev E. V. Understanding Black Sea Dynamics: Overview of Recent Numerical Modeling // Oceanography. 2005. Vol. 18, no. 2. P. 56–75. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.42>
8. Тужилкин В. С., Косарев А. Н. Гидрология и динамика вод Черного и Каспийского морей // Водные массы океанов и морей : к 100-летию А. Д. Добровольского / [ред. : С. А. Добролюбов, А. Н. Косарев]. М. : МАКС Пресс, 2007. С. 208–237.
9. Rachev N. H., Roussenov V. M., Stanev E. V. The Black Sea Climatological Wind Stress // Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology. 1991. Vol. 2, no. 3–4. P. 72–79.
10. Михайлова Э. Н., Полонский А. Б., Шокурова И. Г. О связи интенсивности циркуляции в Черном море с завихренностью поля ветра // Украинский гидрометеорологический журнал. 2013. № 12. С. 193–203. URL: <http://uhmj.odeku.edu.ua/o-svyazi-intensivnosti-tsirkulyatsii-v-chernom-more-s-zavihrennostyu-polya-vetra/> (дата обращения: 31.08.2018).
11. Ефимов В. В., Юровский А. В. Формирование завихренности поля скорости ветра в атмосфере над Черным морем // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 3–12. doi:10.22449/0233-7584-2017-6-3-12
12. Ефимов В. В., Анисимов А. Е. Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 380–392.
13. Ефимов В. В., Шокуров М. В., Барабанов В. С. Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 247–258.
14. Коротаев Г. К. О причине сезонного хода циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2001. № 6. С. 14–20.

15. Физика океана. Том 2. Гидродинамика океана / Ред. В. М. Каменкович, А. С. Монин. М. : Наука, 1978. 455 с. (Серия «Океанология»).
16. *Stanev E. V., Rachev N. H.* Numerical study on the planetary Rossby modes in the Black Sea // *Journal of Marine Systems*. 1999. Vol. 21, iss. 1–4. P. 283–306. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00019-6)
17. *Кубряков А. А., Станичный С. В.* Динамика Батумского антициклона по спутниковым данным // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 2. С. 67–78. doi:10.22449/0233-7584-2015-2-67-78
18. *Леонов А. К.* Региональная океанография. Часть 1. Берингово, Охотское, Японское, Каспийское и Черное моря. Л. : Гидрометеиздат, 1960. 765 с.
19. Восстановление синоптической изменчивости гидрофизических полей Черного моря на основе реанализа за 1980–1993 годы / П. Н. Лишаев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 5. С. 49–68.

*Об авторах:*

**Павлушин Андрей Александрович**, младший научный сотрудник отдела динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: R-4908-2018**, [pavlushin@mhi-ras.ru](mailto:pavlushin@mhi-ras.ru)

**Шапиро Наум Борисович**, ведущий научный сотрудник отдела динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ResearcherID: A-8585-2017**, [n.shapiro@mhi-ras.ru](mailto:n.shapiro@mhi-ras.ru)

**Михайлова Элеонора Николаевна**, старший научный сотрудник отдела динамики океанических процессов, ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, [e.mikhailova@mhi-ras.ru](mailto:e.mikhailova@mhi-ras.ru)