

Динамика вод Каспийского моря над Апшеронским порогом в 2003 году

Г. С. Дьяконов^{1, *}, Р. А. Ибраев^{1, 2, 3}

¹Институт океанологии им. П. П. Ширинова РАН, Москва, Россия

²Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

*E-mail: gleb.gosm@gmail.com

Поступила в редакцию 16.08.2019 г.

Цель. Изучение водообмена между Средним и Южным Каспием, оценка его интенсивности, пространственно-временной структуры и изменчивости – цель данной работы.

Методы и результаты. В исследовании применяется численная модель общей циркуляции Каспийского моря, имеющая достаточно высокое разрешение для описания мезомасштабной структуры течений – 2 км. С применением этой модели реконструирована циркуляция Каспийского моря в 2003 г., рассчитаны основные характеристики переноса вод между Средним и Южным Каспием. Конкретный год выбран в связи с тем, что во все месяцы 2003 г. поля скорости ветра в акватории Среднего и Южного Каспия достаточно хорошо согласовывались со среднеклиматическими. В полученной по модели структуре течений над Апшеронским порогом отмечается следующая закономерность: северные течения наиболее часто формируются над склоном восточного шельфа, южные – над склоном западного, причем последние, как правило, более интенсивны и регулярны. С середины июля по октябрь над Каспием регулярно дуют восточные ветры, в несколько раз усиливая северные течения, несущие вдоль восточного побережья относительно соленые и теплые воды Южного Каспия в Средний. Достаточно стабильное течение, имеющее южное направление, расположено вдоль склона западного шельфа на глубинах 100–150 м и создается градиентом плотности между холодным Средним и теплым Южным Каспием. В целом поток воды над порогом направлен с севера на юг, при этом южные потоки распределены в течение года относительно равномерно, в то время как большая часть расхода северных течений приходится на период с конца июля по декабрь.

Выводы. Поскольку на юге Каспийского моря воды на всех глубинах более теплые и соленые, чем в его центральной части, водообмен двух бассейнов на протяжении всего года способствует росту и температуры, и солености в Среднем Каспии и соответственно их понижению – в Южном. Потоки соли, создаваемые течениями в рассматриваемом районе, достаточны для повышения солености верхнего слоя Среднего Каспия на 0,5‰ за 100 дней, при этом соответствующий рост температуры не превосходит 0,01–0,03°C за сутки. Обратные (южные) течения несут относительно пресные воды в Южный Каспий, понижая соленость его верхнего слоя на величину до 0,2‰ в месяц, однако такие интенсивные интрузии отмечаются лишь в марте и декабре. Влияние этих течений на тепловой баланс Южного Каспия более однородно в течение года и не превосходит 0,17°C/сут.

Ключевые слова: Каспийское море, Апшеронский порог, водообмен, гидродинамическое моделирование.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2019-0002) при поддержке РФФИ (проект № 17-05-01282-а).

Для цитирования: Дьяконов Г. С., Ибраев Р. А. Динамика вод Каспийского моря над Апшеронским порогом в 2003 году // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 6. С. 633–645. doi:10.22449/0233-7584-2019-6-633-645

Dynamics of the Caspian Sea Waters over the Apsheron Sill in 2003

G. S. Dyakonov^{1, *}, R. A. Ibrayev^{1, 2, 3}

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia*

*e-mail: gleb.gosm@gmail.com

Purpose. The paper is aimed at studying water exchange between the Middle and South Caspian, at assessing its intensity, spatial-temporal structure and variability.

Methods and Results. The study includes the numerical model of the Caspian Sea general circulation; it is of sufficiently high resolution for reproducing mesoscale structure of the currents – 2 km. Due to the model, the Caspian Sea circulation in 2003 was reconstructed and the basic characteristics of water transfer between the Middle and the South Caspian were calculated. This specific year was chosen since in all its months, the wind fields in the Middle and South Caspian water areas were in good agreement with the average climatic ones. The simulated structure of the currents over the Apsheron Sill represents the following pattern: the northward currents are most often formed over the eastern shelf slopes, and the southward ones – over the western shelf slope. The latter are usually more intense and regular. From mid July to October, the easterly winds regularly occur over the Caspian Sea strengthening the northward currents, which, in their turn, transfer relatively salty and warm waters of the South Caspian to its Middle regions along the eastern coast. A fairly stable southward stream resulted from the density gradient between the cold Middle and the warm South Caspian, is located along the western shelf slope at the depths 100–150 m. On the whole, the water flow above the sill is directed from north to south. At that the southward flows are distributed rather evenly throughout the year, whereas the major part of the northward currents' flow is observed from late July to December.

Conclusions. Since the South Caspian waters on all the depths are warmer and more salty than those in the Middle regions, water exchange between two basins in course of the whole year, contributes to increase both of temperature and salinity in the Middle Caspian, and to their decrease in the South Caspian, respectively. The current-originated salt flows in the region are sufficient to make salinity grow in the Middle Caspian upper layer by 0.5 psu within 100 days, at that the corresponding temperature increase does not exceed 0.01–0.03°C per day. The reverse southward currents transfer relatively fresh water to the South Caspian that lowers salinity of its upper layer by 0.2 psu per month. However, such intense intrusions are noted only in March and December. The impact of these currents on the South Caspian heat balance is more uniform throughout the year and does not exceed 0.17°C/day.

Key words: Caspian Sea, Apsheron Sill, water exchange, hydrodynamic modeling.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state task of FASO, Russia (No 0149-2019-0002) and at financial support of the Russian Fund for Basic Research (project No 17-05-01282-a).

For citation: Dyakonov, G.S. and Ibrayev, R.A., 2019. Dynamics of the Caspian Sea Waters over the Apsheron Sill in 2003. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(6), pp. 557-568. doi:10.22449/1573-160X-2019-6-557-568

Введение

Каспийское море состоит из трех бассейнов: Северного, Среднего и Южного Каспия, частично отделенных друг от друга полуостровами. Из-за больших различий в рельефе дна, неравномерного пространственного распределения речного стока и большой меридиональной протяженности моря воды этих бассейнов имеют разную термохалинную структуру и режим циркуляции. В крайне мелководном Северном Каспии, являющемся эстуарной зоной крупной реки – Волги, соленость варьируется от нуля до 12‰ и в целом на

несколько промилле ниже, чем в Среднем и Южном Каспии, средняя соленость поверхностных вод которых составляет около 12 и 13‰ соответственно. Еще существеннее различия в термическом режиме трех бассейнов моря. Средняя температура поверхностных вод в Среднем Каспии на 5–6°C ниже, чем в Южном Каспии: летом – вследствие мощного апвеллинга вдоль побережий, зимой – из-за притока холодных вод из Северного Каспия, поверхность которого полностью замерзает. В результате водные массы, вторгающиеся из одного каспийского бассейна в другой, имеют контрастные температуру, соленость и плотность относительно окружающих их вод, вследствие чего в большой степени влияют на тепловой и солевой балансы бассейна, в котором оказываются, и модулируют термохалинную структуру его вод. Это обстоятельство обуславливает особый интерес к динамике Каспийского моря в районах, где происходит такой водообмен, в частности в районе Апшеронского порога, разделяющего глубоководные котловины Среднего и Южного Каспия. Рельеф дна здесь образован слиянием западного и восточного шельфов и имеет седловидную форму. За условную границу между Средним и Южным Каспием примем зональный вертикальный разрез, проходящий через седловую точку дна, а также через оконечность Апшеронского п-ова (40° 12' с. ш.). Глубина моря на этом разрезе составляет в среднем всего 63 м и достигает максимальной величины 165 м в седловой точке.

Несмотря на важность данного района моря для общей циркуляции Каспия, динамика вод в нем исследована недостаточно. В работах [1, 2], анализирующих данные измерений профилей течений, указывается на существование на западе и востоке течений встречных направлений: часть вод циклонического круговорота Среднего Каспия поворачивает на юг, пересекая порог в его западной части, в то время как на востоке происходит втекание относительно тяжелых вод Южного Каспия в Средний [3]. При этом на западе отмечаются вдвое бóльшие скорости, чем на востоке. Такая картина течений подтверждается также и данными спутникового мониторинга поверхностных вод моря [4]. Однако, как отмечается в [1, 2], для точной оценки водообмена между Средним и Южным Каспием необходимо проведение разреза течений по всей длине порога в разные сезоны года. На сегодняшний день таких оценок не существует. Также по данным измерений в этом районе отмечается повышенная изменчивость характеристик водной толщи [5]. В феврале – марте, когда дуют северные ветры, создающие на поверхности дрейфовый перенос на юго-запад, в подповерхностных водах вдоль восточного шельфа существует северное противотечение, формирующее язык теплых вод на поверхности Среднего Каспия [6]. В придонных водах наблюдается квазипостоянный заток холодных вод в Южный Каспий, генерируемый бароклинным градиентом давления, связанным с большой разницей температур между Средним и Южным Каспием [7, 8]. Этот поток обновляет абиссальные воды Южного Каспия каждые 15–25 лет.

Настоящее исследование направлено на изучение особенностей водообмена между Средним и Южным Каспием: его интенсивности, пространственно-временной структуры и изменчивости. Для этого применяется численная модель общей циркуляции Каспийского моря, имеющая достаточно высокое разрешение для описания мезомасштабной структуры течений. Данная рабо-

та является продолжением наших исследований гидрофизики Каспийского моря на временных масштабах от климатических до синоптических с применением модели термогидродинамики океана SZ-КОМПАС [9, 10], разработанной в рамках парадигмы бесшовного прогноза [11, 12].

Численный эксперимент

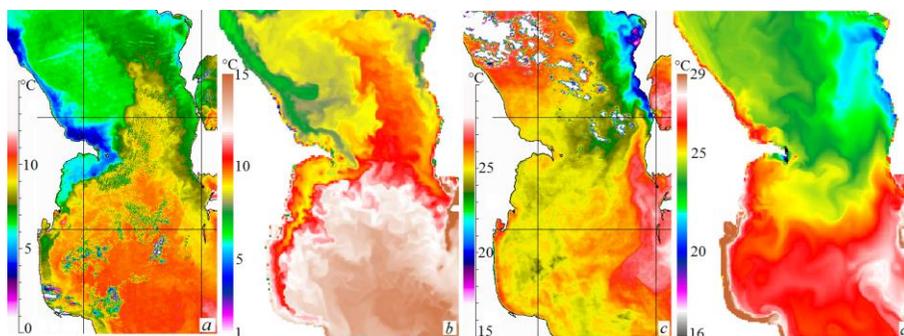
Расчет течений выполнен по модели, описанной в [9], которая ранее применялась для исследования климатических изменений уровня и термохалинной структуры Каспийского моря [10, 13]. Горизонтальное разрешение составляет 2 км, что достаточно для описания мезомасштабной динамики вод: в Каспийском море бароклинный радиус деформации Россби оценивается в 17–22 км в глубоководных районах и в 3–8 км на шельфе в восточной части Среднего Каспия [14]. Вертикальное разрешение – от 2 до 30 м. Для описания горизонтальной турбулентной вязкости используется оператор четвертого порядка с параметризацией Смагоринского [15] с минимальным рекомендованным авторами безразмерным коэффициентом $C = 2$. Среди известных нам численных моделей Каспийского моря только две [16, 17] имеют более высокое разрешение (около 1,5 км), однако используемая нами модель обладает существенно меньшим уровнем диссипации и, следовательно, большим эффективным разрешением, что позволяет воспроизвести широкий спектр движений: от крупно- до мезомасштабных. Для параметризации вертикальной турбулентной вязкости применяется схема Манка – Андерсона с максимальным коэффициентом $K_m = 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. В работе [18] было показано, что, несмотря на простоту, применение схемы Манка – Андерсона дает результаты, качественно не отличающиеся от модели с параметризацией Мэллора – Ямады 2,5 уровня замыкания. Модель инициализируется трехмерными климатическими полями температуры и солености [19] и «разгоняется» в течение трех лет до установления их реалистичного распределения в прибрежных районах. Для задания граничных условий на поверхности моря используются данные *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-Interim* [20], имеющие пространственное разрешение 80 км – высокое для глобального реанализа, но грубое относительно размеров Каспийского моря. Следует учесть, что такой шаг не всегда позволяет описать контуры береговой линии и корректно воспроизвести все физические процессы в прибрежных районах моря. Альтернативой использованию данных глобального реанализа является их регионализация, описанная в [21].

В модельном расчете реконструирована циркуляция Каспийского моря в 2003 г. В этот год в Среднем и Южном Каспии поля приводного ветра – основного фактора формирования течений – во все месяцы достаточно близки к среднеклиматическим, что позволяет получить характерную картину водообмена этих бассейнов без проведения расчетов на большое количество лет и необходимости дополнительного осреднения полученных результатов.

Структура течений над Апшеронским порогом

Структура течений в районе Апшеронского порога, полученная по модели, хорошо согласуется с данными наблюдений [1–5, 7, 8]. В целом отмечается следующая картина: преобладающие северные ветры создают вдоль за-

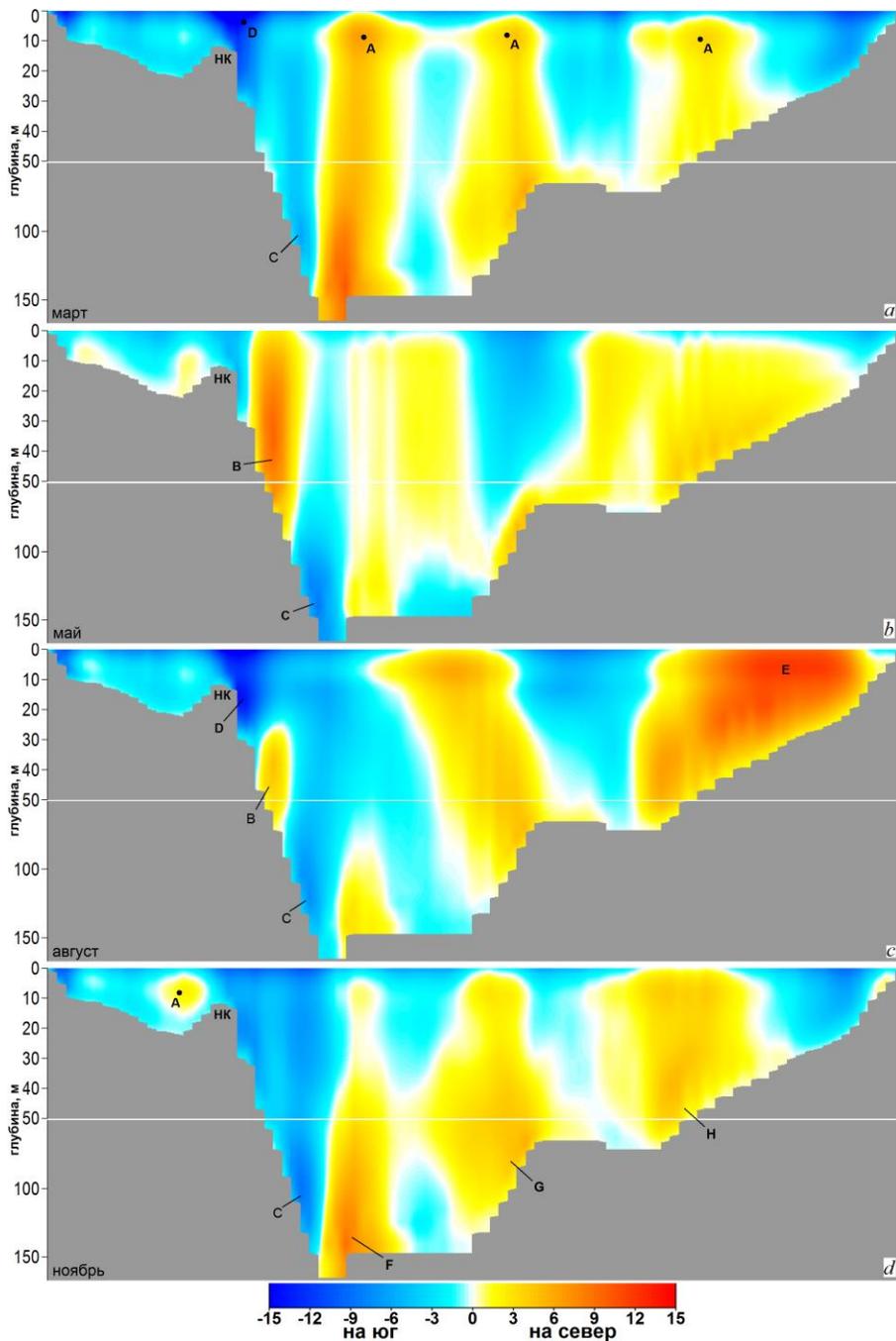
падного шельфа заток относительно пресных и холодных вод из Среднего Каспия в Южный, в то время как вдоль восточного шельфа водные массы движутся в северном направлении. Наиболее четко такое разделение прослеживается в декабре, когда среднемесячные течения южного и северного направлений делят порог на две половины: западную и восточную соответственно. При этом самые интенсивные течения формируются на склонах шельфов и направлены вдоль изобат. Поскольку западный шельф имеет более крутой свал глубин (от Нефтяных Камней до седловой точки дна), течение здесь более когерентно и имеет большие скорости, чем на востоке. Оно хорошо прослеживается на рис. 1, *a, b* (а также на рис. 2 (элемент *D*) и рис. 3, *a*) в виде струи холодных вод, огибающей Апшеронский п-ов и распространяющейся на юг. Следуя изобатам 30–100 м, это течение резко поворачивает на юго-запад восточнее Нефтяных Камней, регулярно формируя в их окрестности антициклонический водоворот диаметром около 20 км.



Р и с. 1. ИК-изображения температуры поверхности Каспийского моря, полученные со спутника NOAA-16 (*a, c*), и температура на горизонте 1 м, полученная по модели (*b, d*). Моменты времени спутниковых снимков и модельных данных совпадают: *a, b* – 31 марта 2003 г., 9:46 GMT; *c, d* – 1 августа 2003 г., 22:33 GMT. Фрагменты *a, c* заимствованы из [4]

F i g. 1. IR-images of the Caspian Sea surface temperature from the NOAA-16 satellite (*a, c*) and those model-derived at the 1 m depth (*b, d*). Time points of satellite images and model data coincide: *a, b* – March 31, 2003, 9:46 GMT; *c, d* – August 1, 2003, 22:33 GMT. The fragments *a* and *c* are taken from [4]

На рис. 2 представлены разрезы меридионального компонента скоростей течений вдоль Апшеронского порога, осредненные за месяцы, в которые наблюдается типичная для четырех сезонов года циркуляция. На поверхности северные ветры с февраля по середину июля, а также в ноябре генерируют дрейфовые течения юго-западного направления. Одновременно в подповерхностном слое моря формируются северные противотечения с ядрами на глубинах 7–10 м (элементы *A* на рис. 2). Именно они несут теплые южно-каспийские воды в Средний Каспий, которые, имея относительно низкую плотность, поднимаются на поверхность и проявляются в виде языка теплых вод (рис. 1, *a, b*). Эти подповерхностные течения не прослеживаются в среднемесячных полях лишь в декабре – январе. С середины июля по октябрь часты ветры восточных румбов, усиливающие в несколько раз северное течение вдоль изобат 10–60 м восточного шельфа (рис. 2, элемент *E*). Это течение отчетливо прослеживается на рис. 1, *c, d* в виде вытянутого языка теплых вод у восточного побережья.



Р и с. 2. Среднемесячный меридиональный компонент скорости в вертикально-зональном разрезе на широте оконечности Апшеронского п-ова ($40^{\circ} 12' \text{ ш.}$) в марте – *a*, мае – *b*, августе – *c*, ноябре – *d*. Латинскими буквами обозначены отдельные элементы структуры течений. НК – Нефтяные Камни

Fig. 2. Monthly average meridian velocity component on the vertical-zonal section at the Apsheron Peninsula tip ($40^{\circ} 12' \text{ N}$) in March – *a*, May – *b*, August – *c*, November – *d*. Latin letters denote individual elements of the currents' structure. НК – Neftyanije Kamni archipelago

Из рис. 2 также видна общая закономерность: северные течения наиболее часто формируются над склоном восточного шельфа (рис. 2, элементы *E, F, G, H*), южные – над склоном западного (рис. 2, элементы *C, D*) и отчасти над плато, образованными дном. Исключение составляет течение вдоль западного шельфа на глубинах до 70 м, которое в теплую половину года – с апреля по сентябрь – имеет преимущественно северное направление (рис. 2, элемент *B*). В остальные 6 мес года оно также подчинено указанной закономерности и сливается с южным течением, существующим на глубинах 100–150 м на протяжении всего года (рис. 2, элемент *C*; рис. 3, *b*). Последнее, согласно [7], создается градиентом плотности между Средним и Южным Каспием, обусловленным большой разницей температур их вод.



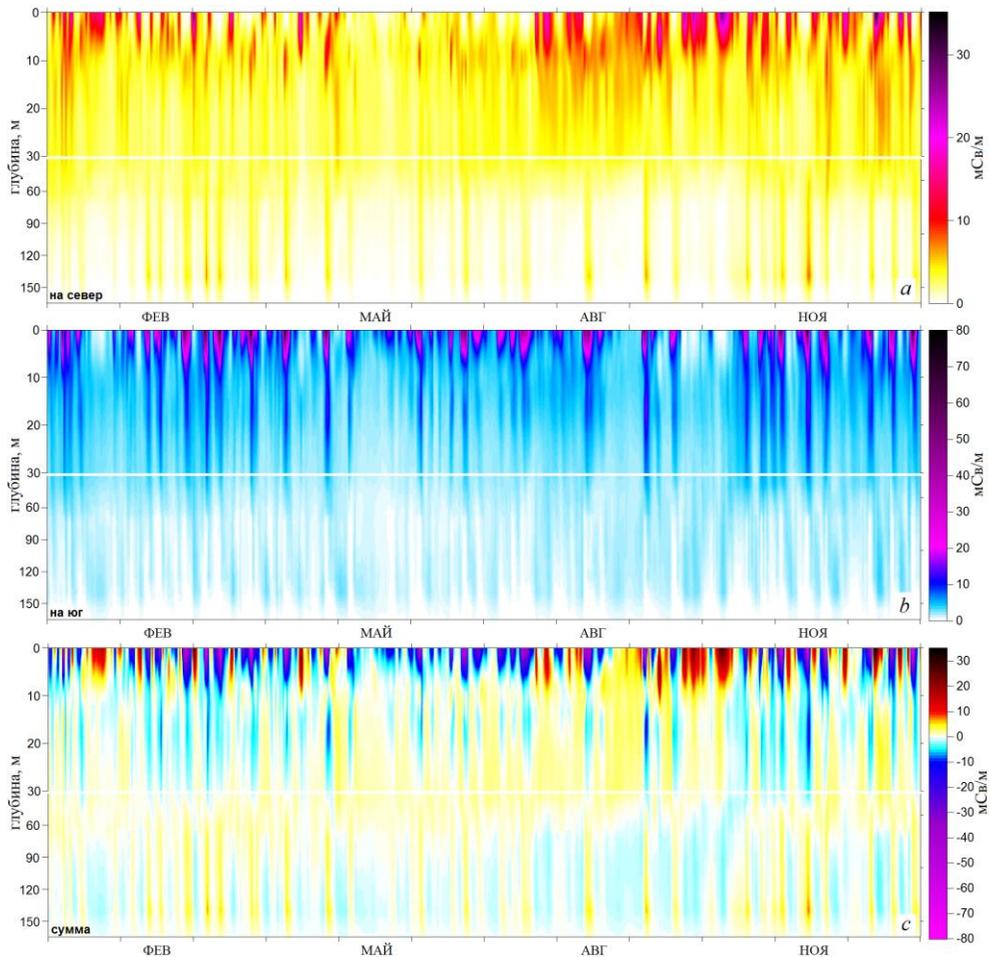
Р и с. 3. Мгновенные поля течений (м/с), полученные по модели: *a* – на горизонте 8 м 16 октября; *b* – на горизонте 100 м 6 июля. Изолиниями показана глубина дна (м)

F i g. 3. Model instantaneous currents (m/s): *a* – at the 8 m depth on October, 16; *b* – at the 100 m depth on July, 6. Contours designate the bottom depth, (m)

Интенсивность водообмена Среднего и Южного Каспия

На рис. 4 представлен расход течений над Апшеронским порогом для обоих направлений (север, юг), а также суммарный расход в зависимости

от глубины и времени. Видно, что в целом перенос водных масс происходит в южном направлении, что связано с затоком речных вод на севере моря, в то время как на Южный Каспий приходится наибольший среди трех бассейнов суммарный поток испарений. Наибольший перенос южно-каспийских вод в Средний Каспий связан с упомянутым выше северным течением вдоль изобат 10–60 м восточного шельфа и начинается в конце июля с учащением восточных ветров. В то же время перенос вод Среднего Каспия на юг распределен в течение года более или менее равномерно.



Р и с. 4. Суммарный по долготе расход течений северного (а) и южного (b) направлений, а также их сумма (c) над Апшеронским порогом в 2003 г. в зависимости от глубины и времени (единицы измерения – мСв/м, т. е. $10^3 \text{ м}^3/\text{с}$ на 1 м глубины)

F i g. 4. Longitude-integral flow rate of the northward (a) and southward currents (b) as well as their sum (c) above the Apsheron Sill in 2003 as a function of depth and time (in mSv/m, i. e. $10^3 \text{ м}^3/\text{с}$ per 1 m of depth)

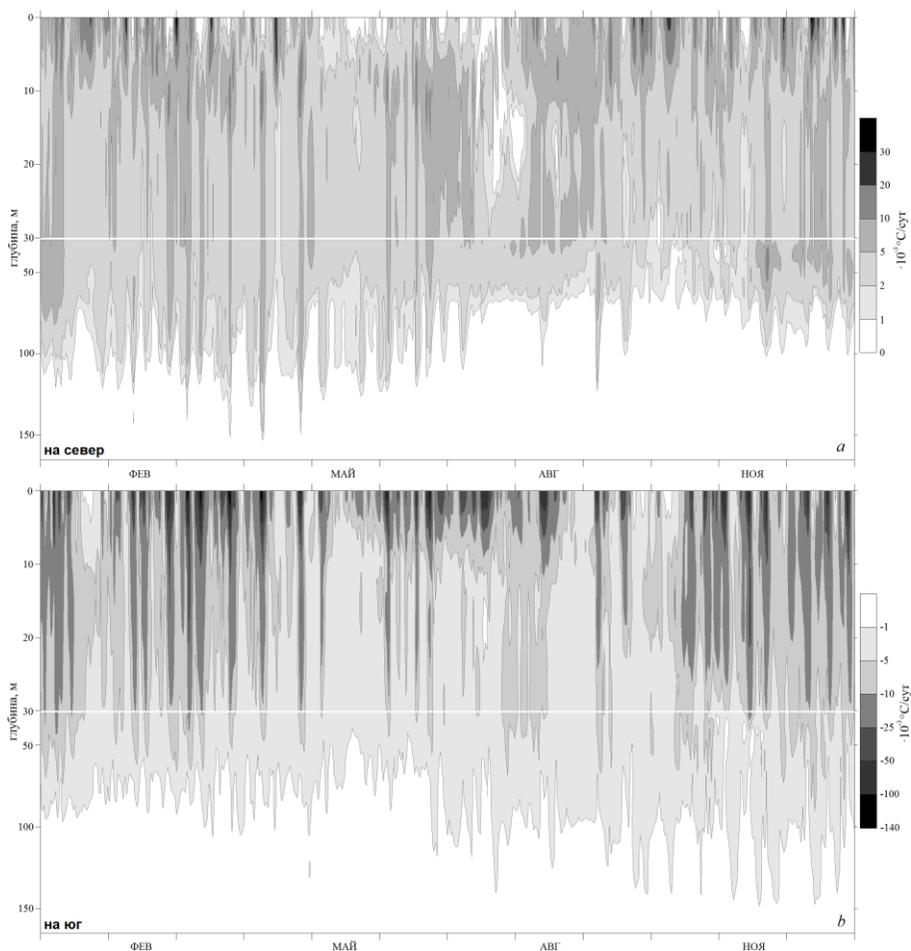
Влияние водообмена на термохалинную структуру моря

Для изучения влияния течений на термохалинную структуру бассейнов Каспия в рассматриваемом районе необходимо отследить траектории вод, которые они несут, и процессы их перемешивания с окружающими водами, что представляет отдельную сложнейшую проблему. Однако оценить значимость этих течений для термохалинного режима Среднего и Южного Каспия можно более простым образом, рассчитав потоки между ними и как-либо соотнеся их с количеством тепла и соли, содержащимся в этих бассейнах. Для этого рассчитаем величину (размерность которой $^{\circ}\text{C}/\text{с}$)

$$DT^{\pm}(z) = \frac{1}{S^{bas}(z)} \int \frac{|v(x,z)| \pm v(x,z)}{2} (T_{flow}(x,z) - \bar{T}^{bas}(z)) dx,$$

где v , T_{flow} – меридиональный компонент скорости и температура течения на широте разреза ($40^{\circ} 12'$ с. ш.); \bar{T}^{bas} – средняя температура на глубине z в бассейне, в который это течение втекает (Средний или Южный Каспий); S^{bas} – площадь сечения этого бассейна горизонтом z . Все функции, кроме S^{bas} , также зависят от времени; интеграл берется по ширине порога. Соответственно DT^{+} характеризует потоки на север, DT^{-} – потоки на юг. Формально эта величина равна скорости изменения средней температуры бассейна \bar{T}^{bas} под влиянием течений, втекающих в него на глубине z , в предположении, что переносимые ими воды вытесняют воды этого бассейна со средней для данной глубины температурой \bar{T}^{bas} и остаются на этой глубине. Поскольку вторгающиеся воды, как правило, погружаются на глубину нейтральной плавучести, прямого физического смысла величина DT^{\pm} не имеет. Однако ее можно рассматривать как количественную меру того, насколько контрастна температура вод, переносимых течением относительно вод бассейна, в который они попадают, а также того, насколько водообмен между Средним и Южным Каспием вообще может повлиять на их термическую структуру.

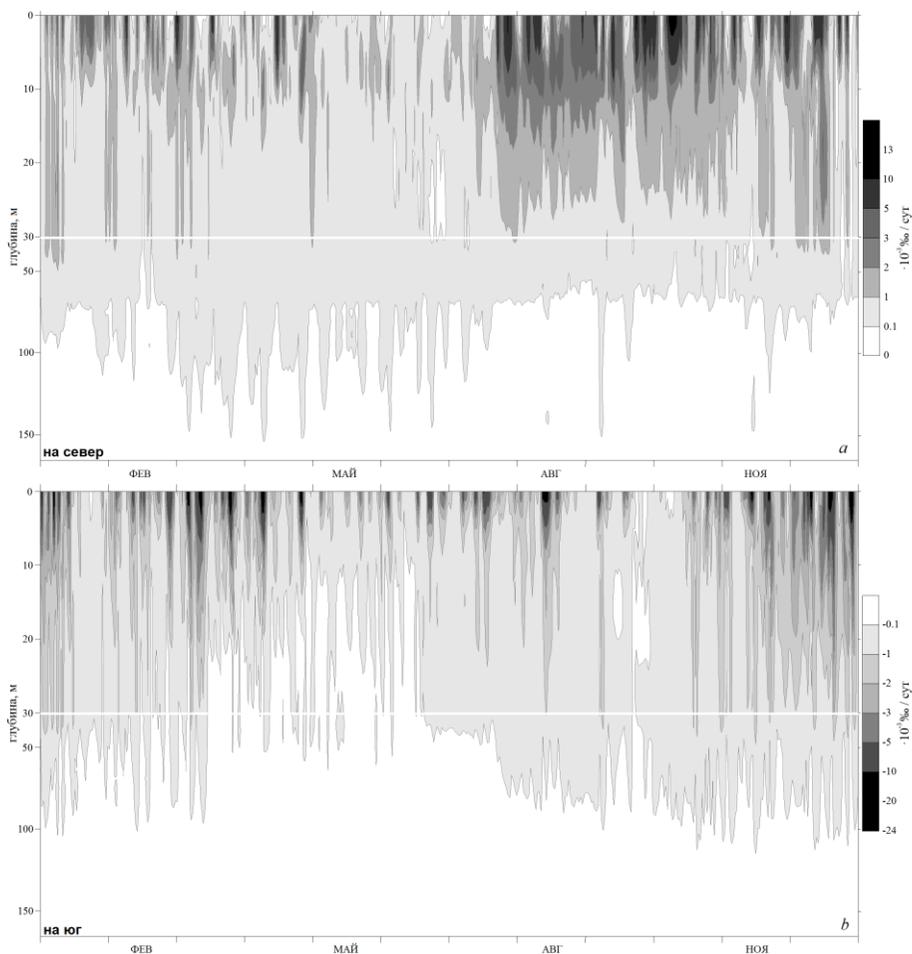
Величины DT^{\pm} показаны на рис. 5. Поскольку воды Среднего Каспия систематически холоднее вод Южного Каспия, эти величины хорошо коррелирует с расходом течений (рис. 4). В Средний Каспий на глубинах до 20 м регулярно попадают южно-каспийские воды, теплозапас которых достаточен, чтобы повышать среднюю температуру этого бассейна на соответствующей глубине лишь на $0,01-0,03^{\circ}\text{C}$ за сутки. Влияние водообмена на Южный Каспий более значительно: регулярно вторгающиеся в него с севера относительно холодные воды понижают его температуру со скоростью до $0,17^{\circ}\text{C}/\text{сут}$ на поверхности и до $0,1^{\circ}\text{C}/\text{сут}$ – в верхнем 30-метровом слое. В целом можно сделать вывод, что влияние водообмена между Средним и Южным Каспием на термический режим этих бассейнов достаточно значительно. При этом холодные интрузии на юг в 2–3 раза интенсивнее, а также более часты и регулярны, чем обратные потоки теплых вод.



Р и с. 5. Потоки тепла на разрезе, рассчитанные по модели: *a* – величина DT^+ (поток на север, $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/сут}$); *b* – величина DT^- (поток на юг, $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/сут}$)

F i g. 5. Sectional heat fluxes calculated by the model: *a* – DT^+ (northward flux, $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C per day}$); *b* – DT^- (southward flux, $10^{-3} \text{ }^\circ\text{C per day}$)

Аналогичным образом проанализируем потоки соли между Средним и Южным Каспием. На рис. 6 показаны величины DS^\pm , рассчитанные по приведенной выше формуле с заменой температуры солёностью. Летом, после половодья на р. Волге, солёность верхнего слоя Среднего Каспия минимальна, поэтому северные течения, несущие относительно солёные воды Южного Каспия с конца июля по октябрь, наиболее существенно восполняют солевой баланс Среднего Каспия: переносимой ими соли достаточно, чтобы повысить солёность его поверхностных вод примерно на 0,5‰ за 100 дней (рис. 6, *a*). Обратные (южные) течения почти всегда несут относительно пресные воды, понижая солёность Южного Каспия. Наиболее сильно они проявляются в конце ноября – декабре, а также в марте – начале апреля, когда за месяц солёность поверхности Южного Каспия может уменьшиться на 0,1–0,2‰ (рис. 6, *b*).



Р и с. 6. Потоки соли на разрезе, рассчитанные по модели: *a* – величина DS^+ (поток на север, 10^{-3}‰/сут); *b* – величина DS^- (поток на юг, 10^{-3}‰/сут)

Fig. 6. Sectional salt fluxes calculated by the model: *a* – DS^+ (northward flux, 10^{-3} psu per day); *b* – DS^- (southward flux, 10^{-3} psu per day)

Заклучение

Средний и Южный Каспий имеют существенно различающуюся термohалинную структуру, поэтому водообмен между ними связан с регулярным вторжением вод с контрастными температурой и соленостью из соседнего бассейна. В представленной работе с применением численной модели трехмерной циркуляции Каспийского моря проведена количественная оценка влияния этого водообмена на тепловой и солевой балансы двух бассейнов Каспия. Течения южного направления более интенсивны и регулярны на протяжении всего года и переносят в 2–3 раза больший объем воды, чем северные течения, основной расход которых приходится на вторую половину года. Аналогичная картина отмечается в потоках тепла: потоки относительно холодных средне-каспийских вод достаточны, чтобы понижать температуру верхнего 30-метрового слоя Южного Каспия со скоростью до $0,1^\circ\text{C/сут}$, а на

поверхности – до $0,17^{\circ}\text{C}/\text{сут}$. В то же время обратные течения, несущие теплые воды на север, могут обеспечить рост температуры Среднего Каспия лишь на $0,01\text{--}0,03^{\circ}\text{C}$ в сутки. Еще более существенен солевой обмен: с конца июля по октябрь северные потоки, распространяющиеся вдоль восточного шельфа, переносят достаточное количество относительно соленых вод, чтобы повысить соленость верхнего слоя Среднего Каспия на $0,5\text{‰}$ за 100 дней. Обратные потоки относительно пресных вод способствуют еще более быстрому снижению солености верхнего слоя Южного Каспия – до $0,2\text{‰}$ в месяц, однако столь существенные значения отмечаются не дольше 1,5 мес: в конце ноября – декабре, а также в марте – начале апреля.

Структура течений над Апшеронским порогом в первую очередь обусловлена распределением ветра в акватории и рельефом дна. Северные течения наиболее часто формируются над склоном восточного шельфа, южные – над склоном западного, причем последние, как правило, более интенсивны и регулярны, поскольку ветры северных румбов преобладают в этом регионе. С середины июля по октябрь над Каспием регулярно дуют восточные ветры, в несколько раз усиливая северные течения, несущие вдоль восточного побережья относительно соленые и теплые воды Южного Каспия в Средний. Достаточно стабильное течение, имеющее южное направление, расположено вдоль склона западного шельфа на глубинах $100\text{--}150$ м и создается градиентом плотности между холодным Средним и теплым Южным Каспием. В целом поток воды над порогом направлен с севера на юг, при этом южные потоки распределены в течение года относительно равномерно, в то время как наибольшие значения расхода северных течений приходится на период с конца июля по декабрь.

При проведении расчетов использовались ресурсы Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и суперкомпьютерного комплекса МГУ имени М. В. Ломоносова [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Амбросимов А. К.* Пространственно-временная изменчивость характеристик течения в глубоководной части Среднего Каспия // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 1. С. 60–77.
2. *Амбросимов А. К.* О циркуляции водных масс в котловине Южного Каспия // *Инженерная физика*. 2018. № 5. С. 108–112. doi:10.25791/infizik.05.2018.019
3. Комплексные исследования системы Каспийского моря в 39-м рейсе научно-исследовательского судна “Рифт” / А. К. Амбросимов [и др.] // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 3. С. 428–432. doi:10.7868/S0030157414020014
4. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.]. М. : ИКИ РАН, 2011. 470 с.
5. Комплексные исследования системы Каспийского моря в 41-м рейсе научно-исследовательского судна “Рифт” / А. К. Амбросимов [и др.] // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 5. С. 715–720. doi:10.7868/S0030157414040017
6. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction / R. A. Ibrayev [et al.] // *Ocean Science*. 2010. Vol. 6, iss. 1. P. 311–329. doi:10.5194/os-6-311-2010
7. *Babagoli Matikolaei J., Aliakbari Bidokhti A., Shiea M.* Some aspects of the deep abyssal overflow between the middle and southern basins of the Caspian Sea // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, iss. 2. P. 459–476. <https://doi.org/10.5194/os-15-459-2019>

8. Analysis of deep-water exchange in the Caspian Sea based on environmental tracers / F. Peeters [et al.] // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2000. Vol. 47, iss. 4. P. 621–654. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00066-7)
9. *Ибраев Р. А., Дьяконов Г. С.* Моделирование динамики океана при больших колебаниях уровня // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 4. С. 514–526. doi:10.7868/S0002351516040064
10. *Дьяконов Г. С., Ибраев Р. А.* Воспроизведение многолетней изменчивости уровня Каспийского моря в гидродинамической модели высокого разрешения // *Океанология*. 2018. Т. 58, № 1. С. 11–22. doi:10.7868/S0030157418010021
11. *Shukla J.* Seamless Prediction of Weather and Climate: A New Paradigm for Modeling and Prediction Research // NOAA Climate Test Bed Joint Seminar Series. Camp Springs, Maryland : 2009. 8 p. URL: https://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/FY09CTBSeminars/shukla_021009.pdf (date of access: 07.08.2019).
12. *Hoskins B.* The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2013. Vol. 139, iss. 672. P. 573–584. <https://doi.org/10.1002/qj.1991>
13. *Dyakonov G. S., Ibrayev R. A.* Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model // *Ocean Science*. 2019. Vol. 15, iss. 3. P. 527–541. <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>
14. Особенности циркуляции вод у восточного берега Среднего Каспия / В. С. Архипкин [и др.] // *Водные ресурсы*. 1992. № 6. С. 36–43.
15. *Griffies S. M., Hallberg R. W.* Biharmonic Friction with a Smagorinsky-Like Viscosity for Use in Large-Scale Eddy-Permitting Ocean Models // *Monthly Weather Review*. 2000. Vol. 128, no. 8. P. 2935–2946. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<2935:BFWASL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<2935:BFWASL>2.0.CO;2)
16. Усовершенствованная технология прогноза течений и уровня Каспийского моря / С. К. Попов [и др.] // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2013. № 5. С. 53–59.
17. Воспроизведение циркуляции Каспийского моря с расчетом атмосферного воздействия с помощью модели WRF / Н. А. Дианский [и др.] // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2016. № 5. С. 21–34. doi:10.17076/lim310
18. *Ибраев Р. А., Курдюмов Д. Г.* Чувствительность сезонной изменчивости циркуляции вод Каспийского моря к параметризации вертикального перемешивания в модели гидродинамики // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2003. Т. 39, № 6. С. 849–856.
19. *Косарев А. Н., Тужилкин В. С.* Климатические термохалинные поля Каспийского моря. М. : СОРБИС, 1995. 96 с.
20. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. Vol. 137, iss. 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828
21. *Анисимов А. Е., Яровая Д. А., Барабанов В. С.* Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 4. С. 14–28.
22. Практика суперкомпьютера «Ломоносов» / Вл. В. Воеводин [и др.] // *Открытые системы СУБД*. 2012. № 7. С. 36–39.

Об авторах:

Ибраев Рашид Ахметзиевич, главный научный сотрудник, группа исследования крупно- и мезомасштабной динамики вод Мирового океана и окраинных морей России на основе моделирования и анализа данных наблюдений, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, д. 8), член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9099-4541**, ibrayev@mail.ru

Дьяконов Глеб Сергеевич, инженер, группа моделирования изменчивости климата океанов и морей, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), **ORCID ID: 0000-0003-1688-1538**, gleb.gosm@gmail.com