

Восстановление полей температуры и солености вод Каспийского моря с помощью гидродинамического моделирования

Н.А. Яицкая

*Институт аридных зон ЮНЦ РАН, г. Ростов-на-Дону
Филиал Института природно-технических систем РФ, г. Ростов-на-Дону*

С использованием гидродинамической Бергенской океанической модели выполнено восстановление полей температуры и солености вод Каспийского моря в узлах регулярной сетки. В качестве исходных данных использованы авторская океанографическая база данных морских экспедиционных исследований и открытые архивы метеорологических наблюдений на прибрежных гидрометеопостах, а также банк ре-анализа NCEP/NCAR. Временная дискретность расчетов составляет одни сутки, пространственная – пять километров. Верификация результатов расчетов выполнялась двумя способами: контроль соответствия результирующих значений заданным в точках разрезов; сравнение результирующих TS-полей с оцифрованными по опубликованным литературным данным. Показано, что полученные значения в целом соответствуют основным представлениям, сформированным к настоящему времени, в том числе и при помощи численного моделирования, и удовлетворяют поставленной задаче – восстановление TS-полей в узлах регулярной сетки. Результаты расчетов по модели БОМ могут быть использованы в качестве входных данных для ретроспективного анализа полей температуры и солености вод моря.

Ключевые слова: Каспийское море, температура вод, соленость, восстановление полей, математическое моделирование

Caspian Sea Water Temperature and Salinity Field Reconstruction Using Hydrodynamic Modeling

N.A. Yaitskaya

*Institute of Arid Zones SSC RAS, Rostov-on-Don
The Branch of the Institute of Natural and Technical Systems
of the Russian Federation, Rostov-on-Don*

Using the hydrodynamic Bergen Ocean Model reconstruction of water temperature and salinity fields of the Caspian Sea for structured grid is performed. The original oceanographic database of marine research, open archives of meteorological observations at the coastal weather stations, and NCEP / NCAR re-analysis are used as the initial data. Time resolution of calculations is one day, spatial is five kilometers. Verification of the calculation results is carried out by two methods: control of compliance of resulting values predetermined in section points; compare the resulting TS-fields with the digitized data from the published in literature. It is shown that the resulted values are consistent with the basic concepts, formed by now, including using numerical simulation and satisfy the task - the restoration of TS-field gridded. BOM calculations results can be used as an input data for retrospective analysis of water temperature and salinity of the Caspian Sea.

Key words: Caspian Sea, water temperature, salinity, field reconstruction, mathematical modeling.

Введение

Каспийское море – уникальный крупнейший в мире солоновато-водный замкнутый бессточ-

ный водоем, характерной особенностью которого являются значительные периодические колебания уровня. Море является чувствительным к флуктуациям внешних факторов и быстро реагирует на такие изменения, при этом изменяются термохалинная структура вод моря, схема вертикального и горизонтального водообмена

ЯИЦКАЯ Наталья Александровна – к.г.н., с.н.с.,
yaitskayan@gmail.com, yaitskayan@mail.ru.

[1–3]. Известно, что на протяжении века это происходило неоднократно, что подтверждается данными натурных наблюдений, TS-полями за отдельные периоды, результатами математического моделирования.

В XXI веке несколькими независимыми группами российских ученых был выполнен анализ термохалинной структуры вод моря, гидрологического режима и климатических изменений в регионе за период инструментальных наблюдений на основе мегабаз данных [4–6]. Особые усилия при этом прилагаются к ретроспективному анализу сезонной циркуляции вод Каспийского моря [5, 7–9]. Но даже у одних и тех же исследователей получаются противоположные результаты [10].

Развитие теоретических исследований в данном направлении показало, что необходимы привлечение более точных моделей, корректировка входных данных и граничных условий. Совершенствование математического аппарата и геоинформационных систем, доступность исторических данных, создание банков ре-анализа метеопараметров и прогнозов, накопленный опыт и знания позволяют решить данную задачу с привлечением гидродинамических и балансовых моделей (например, CaSMOD [11]). При этом расчет непрерывных многолетних среднесуточных TS-характеристик и параметров циркуляции вод моря для более чем векового периода сопряжен с главной проблемой – неравномерно распределенными по пространству и времени данными наблюдений как входной информации для моделей. Поэтому предварительно необходимо выполнение работ по восстановлению полей температуры и солёности вод в узлах регулярной сетки по данным отдельных океанографических станций.

В мировой практике применяются два способа восстановления океанографических полей – с помощью статистических функций путем интерполяции или математического моделирования. Статистический метод является формализованным, он не учитывает конфигурацию бассейна, его рельеф, особенности циркуляции вод, пространственную неоднородность и межгодовую и сезонную динамику океанографических характеристик. Результат зависит только от применяемого математического метода, количества и качества исходных данных, регулярности их пространственного распределения. Применение математических моделей для восстановления океанографических полей позволяет избежать этих недостатков. При таком подходе температура и солёность воды на отдельных океанографических станциях остаются постоянными в течение всего времени моделирования. Тем-

пература и солёность в узлах регулярной сетки, не совпадающих с положением станций, начинают изменяться с учетом заданных значений параметров на этих станциях, циркуляции вод, рельефа дна и конфигурации бассейна, атмосферного форсинга.

В Каспийском море большинство экспедиций при выполнении морских рейсов опираются на сетку «вековых» разрезов (всего 8 разрезов), т.е. измерения выполняются непосредственно на станциях разрезов, либо на небольшом расстоянии от них. В связи с этим остаются районы моря, практически не охваченные исследованиями. Поэтому для этого региона особенно остро стоит проблема корректного восстановления данных.

Материалы и методы

Для восстановления полей температуры и солёности вод (TS-поля) выбрана гидродинамическая модель Bergen Ocean Model (далее BOM или Бергенская модель), разработанная в 1995 г. в Институте морских исследований при Бергенском университете (Норвегия) [12]. Бергенская модель активно применяется для исследования различных океанических процессов как в мировой практике (например, [13, 14]), так и в России [10, 15]. В 2016 г. опубликован новый релиз модели 5.0 ALPHA 6, использованный в работе.

BOM – трехмерная, нестационарная, нелинейная численная модель. Модель учитывает эффект вращения Земли, бароклинность, горизонтальную и вертикальную вязкость и диффузию. Алгоритм рассчитывает внутреннюю (бароклинную) и внешнюю (баротропную) моды течений. В качестве граничных условий на поверхности моря задаются атмосферное давление, ветровое напряжение, потоки тепла и соли. Модель приспособлена и для учета влияния речного стока.

Исходными данными для расчета океанографических полей стали:

- данные наблюдений за температурой и солёностью из авторской океанографической базы данных;
- батиметрическая информация;
- метеорологическая информация и речной сток.

В океанографической базе данных по Каспийскому морю собрана первичная океанографическая информация по 43 333 морским станциям за период с 1897 по 2015 г. [2, 16]: 168 576 измерений температуры воды и 144 289 измерений солёности воды. В работе был использован весь массив данных, дополненный векторизованными полями температуры и солёности вод, опубликованными в литературе или составлен-

ными по результатам отдельных экспедиционных исследований. На временных интервалах, когда данные наблюдений полностью отсутствуют, расчеты выполнялись для среднемноголетних значений т.н. «климатических норм», откорректированных по наблюдениям на прибрежных гидрометеостанциях в соответствии с методом, изложенным в работах [17, 18]. Координаты станций были пересчитаны из географических в прямоугольные. Положение каждой точки задавалось как расстояние в километрах от левого нижнего угла по двум осям, направленным на север и восток соответственно.

Для задания корректной батиметрии была разработана цифровая модель рельефа дна (ЦМР). Информационной основой создания ЦМР стала геоинформационная система (ГИС) «Каспийское море» [2, 19, 20]. Для создания ЦМР использованы 19 гидрографических карт масштаба 1:750 000, 1:200 000, 1:100 000, 1:50 000, опубликованных в 1992–2009 гг. и соответствующих среднему положению уровня моря минус 27 м. ЦМР разработана с высоким разрешением ($0.001^\circ \times 0.001^\circ$), что позволяет создавать локализованные сетки без потери информации и искажения глубин.

На основе ЦМР для среднего многолетнего положения уровня Каспийского моря был разработан ряд сеточных областей для четырех сценариев изменения уровня: минус 26,1 м (1900–1934 гг.), минус 28,4 м (1948–1970 гг.), минус 28,8 м (1971–1980 гг.), минус 27,6 м (1935–1947 гг., 1981–1996 гг.), минус 27 м (1997–2015 гг.). Пространственное разрешение расчетных сеток составило 5х5 км.

Метеоданные для расчетов были получены из открытых архивов ЕСИМО, RP5, ре-анализа NCEP/NCAR. Также привлекались результаты попутных судовых метеонаблюдений из океанографической базы данных.

Сток рек, объем стока, соленость (принята 0‰) и температура речных вод были заданы в соответствующие области. Сток Волги, распределенный «классическим образом» на левый и правый рукава, дает при моделировании заниженные значения солености в зонах непосредственного влияния и неправдоподобно высокие скорости стоковых течений. Для исключения появления ошибок такого рода выделены пять рукавов, из которых и был направлен сток Волги – Бахтемир (28% стока), Бузан (35%), Старая Волга (11%), Камызяк (16%), Большая Болда (6%), Рычан (4%).

Результаты и обсуждение

Адаптация модели выполнялась для гидрометеорологических условий 1973 г. Были рассчи-

таны поля пространственного распределения солености и температуры воды, циркуляция вод, параметры фронтальной зоны солености при различных гидрометеорологических условиях. В течение всех расчетов конфигурация TS-полей изменялась под действием силы ветра и разности плотностей. Результаты расчетов верифицировались двумя способами:

1) контроль соответствия результирующих значений заданным в точках разрезов;

2) сравнение результирующих TS-полей с оцифрованными по опубликованным литературным данным.

Расчеты для восстановления среднесуточных TS-полей вод Каспийского моря в узлах регулярной сетки проводились для периода с 1900 по 2015 г. Различия солености между расчетными и измеренными значениями в центральных частях моря вдоль меридионального разреза составляют в среднем $\pm 0,2$ ‰, в отдельных случаях до 0,6 ‰. Коэффициент корреляции небольшой – 0,46. До 12,8 ‰ модель несколько занижает значения, а выше 12,8 ‰ – завышает (рис. 1). Для температуры воды коэффициент корреляции составляет 0,79, а разность между наблюдаемыми и расчетными значениями $\pm 5,0$ °C (рис. 2). Наибольшие различия наблюдаются в слоях 30–75 м. Причем сопоставление климатического сезонного хода для «вековых» разрезов, рассчитанного по наблюдениям в океанографической базе данных [2] и по результатам расчетов, показывает аналогичную динамику (рис. 3).

Полученные данные в целом удовлетворяют поставленной задаче – восстановление TS-полей в узлах регулярной сетки. И результаты расчетов по модели WOM могут быть использованы в качестве входных данных для ретроспективного анализа полей температуры и солености вод моря.

Предварительный анализ результатов расчетов показал, что осенние и зимние поля характеризуются увеличением температуры воды с севера на юг и с запада на восток в диапазоне 0–12 °C. Можно отметить квазиширотную зону в районе Апшеронского полуострова на границе между Средним и Южным Каспием. К марту наблюдается постепенный прогрев водных масс, наиболее заметный на юге у Иранского побережья. К апрелю область минимальных температур (< 9 °C) сохраняется лишь в Среднем Каспии, где может находиться до июня включительно. В то время как в Северном Каспии наблюдается интенсивный прогрев вод за счет мелководности, то в Южном Каспии – за счет географических особенностей. Летом на большей части акватории моря температура воды в поверхностном слое составляет 23–28 °C. Вдоль

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕНОСТИ ВОД КАСПИЙСКОГО МОРЯ

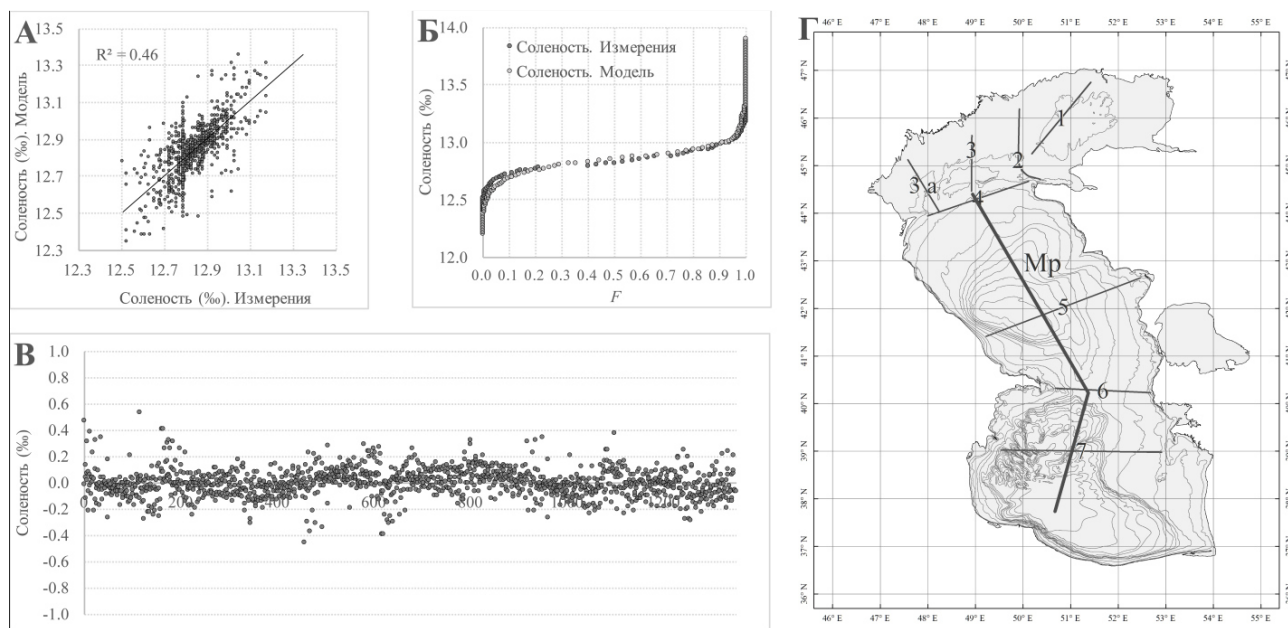


Рис. 1. Сопоставление результатов моделирования и измерений [2] солёности вдоль меридионального разреза в Каспийском море: А – регрессионная зависимость данных наблюдений и результатов моделирования; Б – функции распределения; В – разница между данными наблюдений и результатами моделирования; Г – положение меридионального разреза относительно «вековых» разрезв и основных изобат

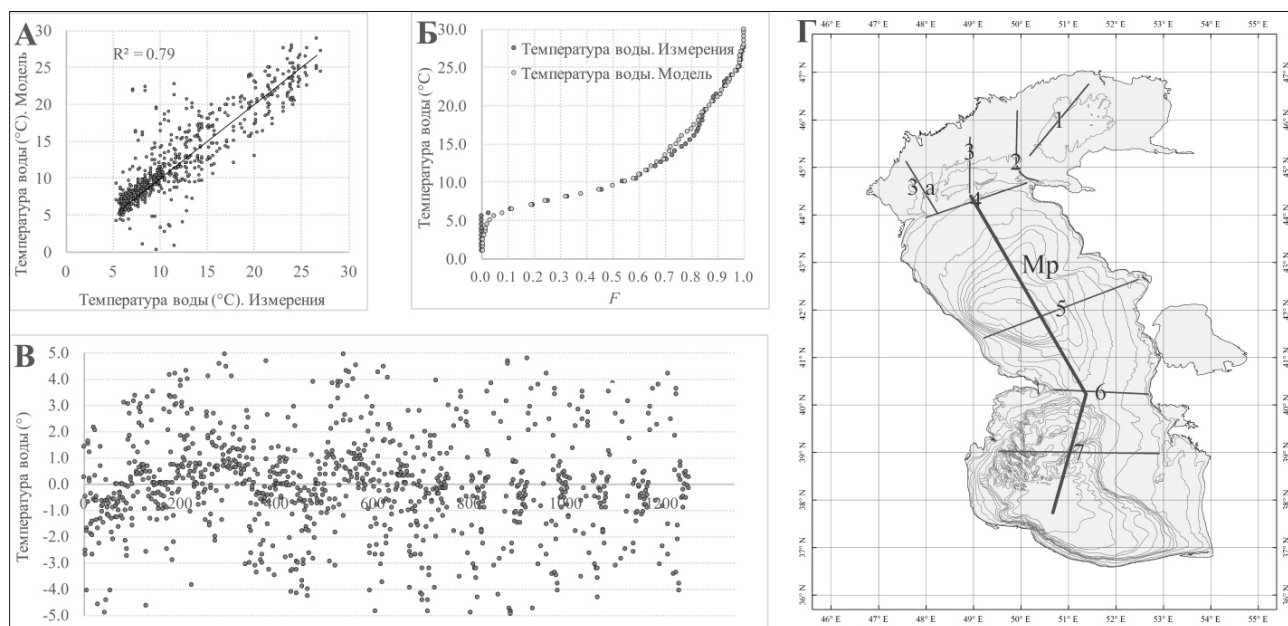


Рис. 2. Сопоставление результатов моделирования и измерений [2] температуры воды вдоль меридионального разреза в Каспийском море. Усл. обозначения те же, что и на рис. 1

восточного побережья Среднего Каспия поверхностная температура понижается до 20–21 °C. В Среднем Каспии уменьшение сезонных разностей происходит за счет относительно высоких зимних температур и невысоких летних, в районе Апшеронского порога и Южном Каспии, главным образом, за счет высоких зимних температур.

Годовой минимум температуры воды в Каспийском море отмечается в феврале. Наиболее

низкие значения (самые холодные районы) – приустьевое взморье р. Волги и р. Урала (0,09 °C и 0,4 °C соответственно). Здесь же отмечаются и высокие летние температуры – более 28 °C. Наиболее высокие зимние температуры характерны для Южного Каспия. В мелководном Северном Каспии на глубине 5 м происходит незначительное (до 1,50 °C) уменьшение летних температур, а увеличение зимних характерно только для западной части (до 0,6 °C). На

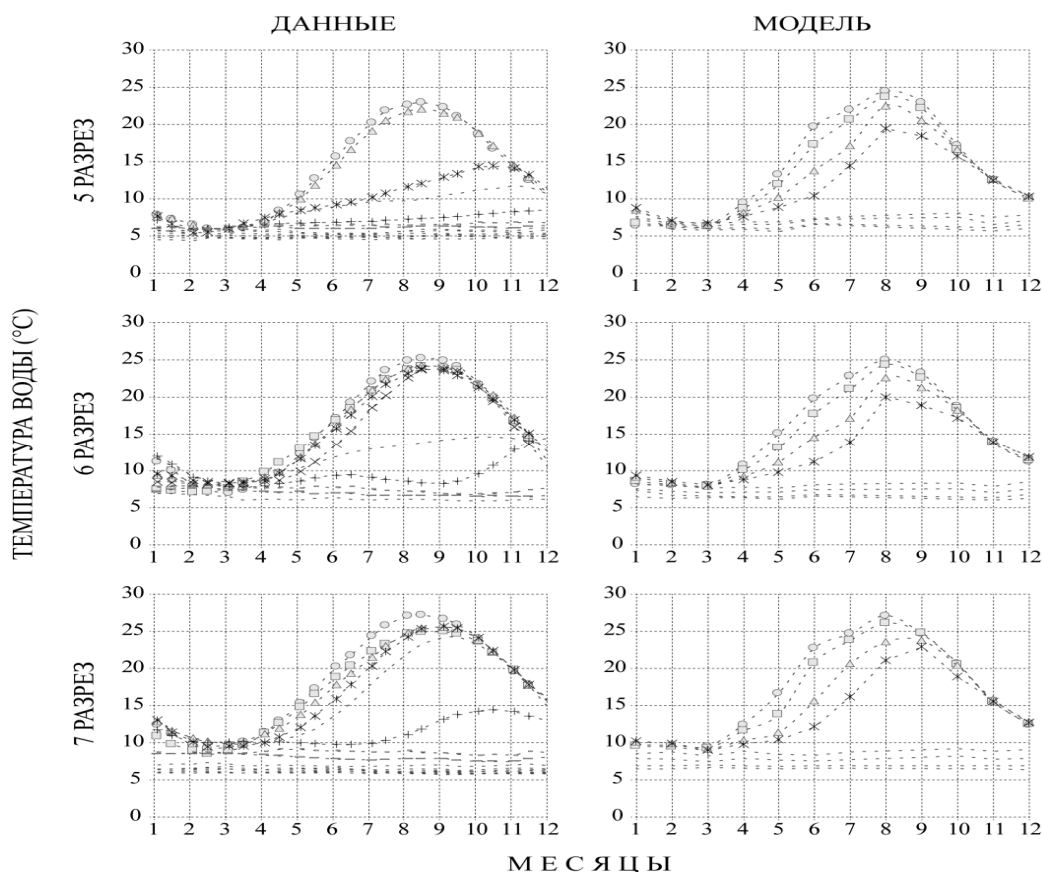


Рис. 3. Сезонное распределение температуры воды в Каспийском море на глубоководных разрезах, восстановленных по данным океанографической базы данных [2] и результатам моделирования

остальной акватории с глубиной происходит уменьшение сезонных различий и среднегодового значения при увеличении зимних и уменьшении летних температур. Такие изменения происходят на всей акватории.

Смещение месяцев максимальной и минимальной температур, сопровождающееся значительным уменьшением летних температур, происходит на горизонте 20 м в районе свала глубин в Северном и Среднем Каспии на март и сентябрь–октябрь соответственно. В районе Апшеронского порога и в Южном Каспии процесс происходит медленнее и изменение сезонного хода заметно только на глубине 30 м. При этом в Южном Каспии осенние температуры продолжают оставаться высокими – до 24 °C. На горизонте 50 м в Среднем Каспии сезонных различий практически нет. Максимальная разность составляет 2 °C. В районе Апшеронского порога и в Южном Каспии сезонные различия составляют 6 °C и 4 °C. На глубине 75 м в котловинах сезонная разница температур колеблется в пределах 1 °C. И уже на горизонте 150 м во всех районах составляет менее 1 °C. С 200 до 300 м в котловинах температура продолжает понижаться в среднем на 0,2 °C на 100 м. Ниже 300 м на каждые 100 м уменьшение температуры составляет 0,1 °C.

Соленость вод моря – менее устойчивый параметр, чем температура, и для него характерна значительная пространственно-временная изменчивость. По полученным результатам можно сказать, что в Северном Каспии в среднемноголетнем режиме располагается соленостный фронт, южная граница которого определяется значениями 11–12 ‰. С весны до осени фронтальная зона стабильна по расположению и только в мае смещается к югу вдоль западного побережья Среднего Каспия на 50–100 км.

Распространение трансформированных опресненных вод в Средний Каспий наблюдается по положению изогалины 12,5 ‰. Наибольшая соленость (более 13 ‰) во все месяцы года наблюдается в юго-восточной области Южного Каспия, минимальная (менее 5 ‰) – в приустьевом взморье р. Волги и р. Урала в Северном Каспии.

Среднее отклонение солености на горизонте 20 м составляет около 0,3 ‰, что практически на порядок меньше, чем на поверхности, а на горизонте 50 м контрастность полей солености, в свою очередь, почти в 1,5 раза меньше, чем на горизонте 20 м. Однако минимум солености здесь расположен в северо-западной части моря.

В целом, на большей части акватории Среднего и Южного Каспия различия в солёности не выходят за пределы 12–13,4 ‰, возрастая с северо-запада на юго-восток. Причина может заключаться в том, что вдоль западного берега распространяются воды, опресненные речным стоком, тогда как вдоль восточного аридного побережья солёность более высокая. Наибольшая солёность на рассматриваемых горизонтах наблюдается на юго-восточном шельфе моря. В толще вод солёность от поверхности до дна изменяется в пределах 0,2–0,3 ‰.

Заключение

К условиям акватории Каспийского моря адаптирована гидродинамическая модель Bergen Ocean Model (BOM). Подготовлены исходные начальные и граничные условия для непрерывных многолетних расчетов. Выполнен расчет с помощью BOM непрерывных рядов среднесуточных TS-характеристик и параметров циркуляции вод моря в XX–XXI вв. на основе имеющейся метеорологической информации из ГИС «Каспийское море», океанографической базы данных, данных ре-анализа NCEP/NCAR и архива ЕСИМО. Сравнение с данными морских и прибрежных наблюдений показало, что полученные значения в целом соответствуют основным представлениям, сформированным к настоящему времени, в том числе и при помощи численного моделирования [5, 21, 22], и удовлетворяют поставленной задаче – восстановление TS-полей в узлах регулярной сетки. И результаты расчетов по модели BOM могут быть использованы в качестве входных данных для ретроспективного анализа полей температуры и солёности вод моря.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-35-60046 мол_а_дк.

Литература

1. Матишов Г.Г., Яицкая Н.А., Бердников С.В. Особенности внутривекового режима солёности Каспийского моря // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444, № 5. С. 549–553.
2. Яицкая Н.А. Термохалинный режим Каспийского моря при изменении уровня: Автореф. дис. ... к.г.н. Мурманск, 2012. 28 с.
3. Яицкая Н.А., Бердников С.В. Трансформация водообмена и режима солёности Каспийского моря в XX веке. Данные наблюдений и математическое моделирование // Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья. 2015. Т. 1. С. 356–357.
4. Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря. Институт водных проблем РАН. М.: Наука, 2005. 356 с.
5. Тужилкин В.С. Сезонная и многолетняя изменчивость термохалинной структуры вод Черного и Каспийского морей и процессы ее формирования: Дис. ... д.г.н. М., 2008. 313 с.
6. Тужилкин В.С., Косарев А.Н. Гидрология и динамика вод Черного и Каспийского морей // Водные массы океанов и морей. М.: МАКС-пресс, 2007. С. 208–237.
7. Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Трухчев Д.И., Иванова Д.П. Сезонные особенности общей циркуляции вод глубоководной части Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1997. № 1. С. 91–99.
8. Trukhchev D.I., Kozarev A.N., Ivanova D.P., Tuzhilkin V.S. Numerical analysis of the general circulation in the Caspian Sea // Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sci. 1995. V. 48, № 11–12. P. 35–38.
9. Tuzhilkin V.S., Kosarev A.N. Thermohaline Structure and General Circulation of the Caspian Sea Waters // The Caspian Sea Environment. 2005. V. 5. P. 33–57 (DOI 10.1007/698_5_003).
10. Архипкин В.С., Косарев А.Н., Гунпиус Ф.Н., Мугали Д.И. Сезонная изменчивость климатических полей температуры, солёности и циркуляции вод Черного и Каспийского морей // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2013. № 5. С. 33–44.
11. Бердников С.В. Разработка и применение компартментальных моделей для изучения пространственных характеристик морских экологических систем: Дис. ... д.г.н. Мурманск, 2004. 335 с.
12. Berntsen J., Svendsen E. and Ostrowski M. (1996) Validation and sensitivity study of a sigma-coordinate ocean model using the Skagex dataset. ICES CM 1996/C:5.
13. Avlesen H. Advanced user support: On the parallelization of a non hydrostatic, sigma coordinate ocean model. 2004. P. 1–8.
14. Rygg K., Enstad L.I., Alendal G. Simulating CO₂ transport into the ocean from a CO₂ lake at the seafloor using a z- and a σ-coordinate model // Ocean Dynamics. 2009. V. 59, iss. 6. P. 795–808.
15. Пицальник В.М., Архипкин В.С., Леонов А.В. О циркуляции вод в Татарском проливе // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, №6. С. 657–670.
16. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Zhichkin A.P., Dzhenyuk S.L., Smolyar I.V., Kulygin V.V., Yaitskaya N.A., Povazhniy V.V., Sheverdyayev I.V., Kumpan S.V., Tret'yakova I.A., Tsygankova A.E., D'yakov N.N., Fomin V.V., Klochkov D.N., Shatohin B.M., Plotnikov V.V., Vakul'skaya N.M., Luchin V.A., Kruts A.A. Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern

Hemisphere (1827–2013). Matishov, G.G., Sherman, K., Levitus, S. (Eds.). NOAA Atlas NESDIS 78. 2014. 131 p.

17. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Чернышева Е.С. Новое поколение справочников по режиму волнения морей // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2011. Вып. 34. С. 50–65.

18. Лопатухин Л.И. Ветровое волнение: Учебное пособие. 2-е дополненное издание. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. 165 с.

19. Яицкая Н.А., Лоцинская В.В. Создание геоинформационной системы южных морей России для сохранения исторической картографической информации // Экология, экономика, информатика. Т.2. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. С.211–217.

20. Магаева А.А., Яицкая Н.А. Описание геоинформационной системы ледового режима южных морей России // Экологическая стратегия развития прибрежных регионов: география, окружающая среда, население. Медико-экологические и социально-экономические проблемы прибрежных регионов. Ростов-на-Дону, 2015. С. 114–121.

21. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 360 с.

22. Курдюмов Д.Г., Озгой Э. Среднемесячные характеристики внутригодовой изменчивости циркуляции вод Каспийского моря, полученные по вихреразрешающей термогидродинамической модели // Океанология. 2004. Т. 44, № 6. С. 843–853.

Поступила в редакцию 24.01.2017

УДК 574.583

Литоральные и пелагиальные планктонные сообщества высокогорного оз. Шебеты (Забайкальский край)

Е.Ю. Афонина, Н.А. Ташлыкова

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита

Представлены материалы по исследованию планктонной флоры и фауны высокогорного оз. Шебеты. Водоем расположен в границах буферной зоны Байкальской природной территории в составе национального парка «Чикой» (Красночикойский район, Забайкальский край). Сбор и обработка образцов проводились стандартными гидробиологическими методами. В составе фито- и зоопланктона отмечено по 35 таксонов рангом ниже рода. Наибольшее таксономическое разнообразие встречалось среди диатомовых водорослей и ветвистоусых ракообразных. Основную часть видового состава составляли широко распространенные эврибионтные и пелагофильные виды. Характерными обитателями глубокого ледникового озера являлись среди водорослей: *Chrysococcus rufescens*, *C. biporus*, *Kephyrion doliolum*, *Mallomonas caudate*; среди беспозвоночных: *Conochilus unicornis*, *Kellicottia longispina*, *Holopedium gibberum*, *Arctodiaptomus neithammeri*, *Cyclops abyssorum*, *Atteyella nordenskjoeldi*. Литоральное планктонное сообщество отличалось более богатым качественным и количественным составом по сравнению с пелагиальным. В прибрежье в составе фито- и зоопланктона чаще встречались представители фитофильного и литорального комплексов, в глубоководной части озера доминировали пелагофильные формы гидробионтов. В поверхностных слоях воды преобладал мелкоразмерный планктон (синезеленые и зеленые водоросли, коловратки и науплиальные стадии копепода), в придонных – диатомовые, золотистые и динофитовые водоросли, веслоногие ракообразные, имеющие крупные размерные характеристики.

Ключевые слова: фитопланктон, зоопланктон, видовой состав, численность, биомасса, высокогорное ледниковое оз. Шебеты.

АФОНИНА Екатерина Юрьевна – к.б.н., н.с., kataf@mail.ru; ТАШЛЫКОВА Наталия Александровна – к.б.н., н.с., nattash2005@yandex.ru.