

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК. 551.464.3

ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВОДООБМЕНА ВОД КАСПИЙСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕХОДЯЩИХ ТРАССЕРОВ

© 2019 г. В. С. Брезгунов^{1,*}

¹Институт водных проблем РАН
Россия 119991 Москва
*e-mail: brez@iwp.ru

Поступила в редакцию 01.02.2018 г.

После доработки 19.02.2019 г.

Принята к публикации 11.04.2019 г.

Проведен анализ достоверности разных сценариев формирования вертикальной структуры вод Каспийского моря, полученных по результатам распределения переходящих трассеров (CFC-11, CFC-12, ³H и ³He) на глубоководных станциях Среднего и Южного Каспия в рамках проведенных международных комплексных изотопно-геохимических исследований в период максимального подъема уровня моря в 1995–1996 гг. С учетом доступных гидрометеорологических данных и особенностей датирования вод с помощью используемых переходящих трассеров сделан вывод, что после крупномасштабной гравитационной конвекции в Среднем Каспии, вызванной аномальным охлаждением поверхностных вод в Северном Каспии в конце зимы 1976 г., сформировалась структура водных масс, исключавшая вентиляцию глубинных вод в Среднем и Южном Каспии до середины 1990-х гг.

Ключевые слова: Каспийское море, вертикальный водообмен, переходящие трассеры.

DOI: 10.31857/S0321-0596465496-502

Начавшееся в середине 1970-х гг. повышение уровня Каспийского моря привлекло внимание исследователей к проблеме многолетней изменчивости гидрологического режима моря в связи с вариациями климата, в частности к изменению вертикальной структуры вод и связанной с ней вентиляцией глубинных вод Каспийского моря [4, 6–8].

На основе анализа изменчивости многолетней вертикальной термохалинной структуры вод Каспийского моря выявлены два типа гидрологических режимов, определяющих вертикальную плотностную устойчивость вод в глубинных областях Каспийского моря. В периоды увеличения речного стока и связанного с ним повышения уровня моря вертикальный водообмен замедляется вплоть до полного прекращения вентиляции глубинных вод. Именно такое состояние характерно для Каспийского моря в период подъема его уровня с середины 1970-х до середины 1990-х гг. [6]. С другой стороны, активный водообмен поверхностных и глубинных вод имеет место в периоды низкого стояния уровня моря, особенно в тех случаях, когда

уменьшение речного стока сочетается с суровыми зимами.

Проведенные в 1994–1996 гг. комплексные исследования Каспийского моря позволили охарактеризовать картину распределения океанографических, изотопных и гидрохимических параметров на стадии стабилизации уровня моря после почти 20-летнего периода его подъема в связи с особенностями вертикального водообмена моря в этот период.

В первой публикации по результатам этих исследований [11], содержащей интерпретации исключительно изотопных данных, отмечается значимое различие содержания ¹⁸O в поверхностных и глубинных водах основной акватории Каспийского моря. Это позволило авторам сделать вывод, что глубоководная часть моря сформировалась во время низкого стояния его уровня в середине 1970-х гг., когда соотношение составляющих водного баланса моря (приток пресных вод – испарение) было иным, нежели в период опробования. Оцененный по распределению трития и гелия-3 возраст водных

масс, лежащих ниже горизонта 300 м в Среднем и Южном Каспии, составляет 20–25 лет [11].

Более детальное рассмотрение результатов изотопного анализа [1, 9] позволило получить дополнительную информацию об особенностях гидрологической структуры и о генезисе глубинных водных масс Среднего и Южного Каспия. Сопоставление параметров уравнений линейной зависимости изотопного состава кислорода от солености ($\delta^{18}\text{O} - S$) в разных водных массах моря, опробованных в 1995 г., с учетом изотопных эффектов при фазовых переходах воды и опреснении речными водами, дали возможность сделать вывод, что на S глубинных водных масс Среднего Каспия (ниже горизонта 100 м) заметно влияли процессы ледообразования. По результатам анализа диаграммы $\delta^{18}\text{O} - S$ средних значений этих параметров для четырех дифференцированных по глубине слоев Каспийского моря глубинные воды Южного Каспия – смесь глубинных вод Среднего Каспия с подповерхностными водами моря [9].

Наиболее обстоятельно вопрос об особенностях вертикального водообмена вод Каспийского моря на основе анализа распределения традиционных океанографических параметров и преходящих, неконсервативных во времени трассеров (“transient tracers”) в воде моря в рамках проведенных исследований 1995–1996 гг. рассмотрен в работе [14]. Кроме ^3H и ^3He , для оценки возраста глубинных вод авторами этой работы использовались результаты определения концентраций растворенных в воде хлорфторуглеродов (CFC-11 и CFC-12) и атмосферных благородных газов.

Хлорфторуглероды (фреоны) — высоколетучие, химически инертные у земной поверхности вещества, широко применяемые в производстве и быту в качестве хладагентов (холодильники, кондиционеры, рефрижераторы), пенообразователей и распылителей. Интенсивное производство фреонов началось в конце 1920-х гг. и было прекращено в конце 1980-х гг., поскольку поступление фреонов в атмосферу — один из самых действенных факторов разрушения ее озонового слоя. Парциальное давление фреонов в атмосфере быстро возрастало с начала 1930-х до середины 1990-х гг. Временная шкала этого роста надежно задокументирована [10]. С начала 1950-х до середины 1990-х гг. количество фреонов в земной атмосфере ежегодно увеличивалось на 8–9%. Атмосфера — единственный источник поступления хлорфторуглеродов в морскую среду и континентальные водоемы.

При этом предполагается, что концентрация растворенного в воде хлорфторуглерода находится в равновесии с его парциальным давлением в атмосфере.

Наиболее распространенные хлорфторуглероды CFC-11 и CFC-12 (CCl_3F и CCl_2F_2) практически не гидролизуются в тех открытых водоемах, где они используются в качестве преходящих трассеров, поскольку анализируемые образцы воды содержат измеримые количества растворенного кислорода. Такие природные водоемы не являются стоком для этих фреонов, а представляют собой лишь резервуары, из которых фреоны опять поступают в атмосферу.

Сопоставление измеренных концентраций хлорфторуглеродов в воде океанов, морей и глубоководных озер с хронологической шкалой изменения парциального давления их в атмосфере дает принципиальную возможность определить время последнего контакта водных образцов с атмосферой. Надежное датирование этого события требует данных по температуре воды для оценки равновесной концентрации фреона в поверхностном слое воды.

Одновременное определение концентраций ^3H и ^3He также позволяет оценить время поступления вод из поверхностного слоя в глубинные слои водоемов. В природные водоемы ^3H поступает с атмосферными осадками, речным стоком и в результате влагообмена на поверхности водоема. Опускаясь в глубинные слои, ^3H распадается с образованием дочернего продукта — ^3He . Сопоставление концентраций ^3H и радиогенного ^3He в водных образцах позволяет определить время переноса воды из поверхностного в глубинные слои. Идентификация радиогенного ^3He в воде проводится с учетом его природных источников — атмосферного и мантийного. Таким образом, глубоководные водоемы — область стока для ^3H , в то время как поток ^3He приводит к увеличению его содержания в глубинных водах по сравнению с поверхностными.

Оценка “кажущегося” (“apparent”) возраста глубинных вод на основе распределения CFC-11, CFC-12, ^3H и ^3He использовалась при исследовании механизма вентиляции водной толщи в морской среде и крупных озерах [15, 16].

Интерпретация результатов вертикального распределения CFC-11, CFC-12, ^3H и ^3He на станциях Среднего и Южного Каспия в 1995–1996 гг. в районе максимальных глубин позволила авторам работы [14] сделать оригиналь-

ные, но неоднозначные выводы о характере вертикального водообмена в Каспийском море.

Возрастные характеристики водных масс Среднего и Южного Каспия и анализ вертикальной устойчивости водной толщи Каспийского моря в конце лета 1995 г. позволили авторам [14] предположить, что глубоководный обмен в море может происходить в результате прерывистого процесса с редким крупномасштабным конвективным перемешиванием. Оцененное по содержанию преходящих трассеров время пребывания воды ниже глубины 500 м в Среднем и Южном Каспии дали возможность авторам [14] сделать вывод, что последнее такое событие произошло в 1976 г. — незадолго до того, как начался подъем уровня Каспийского моря. После этого вертикальный водообмен в море существенно замедлился. При этом вентиляция глубинных вод практически отсутствовала, о чем свидетельствует однородное по вертикали содержание преходящих трассеров в водной массе глубже 500 м. Оцененное авторами [14] по концентрациям CFC-12, ^3H и ^3He среднее время пребывания воды в слое ниже глубины 500 м относительно сезонного смешанного слоя в 1995–1996 гг. в Среднем и Южном Каспии лежит в диапазоне 17–21 года. В целом выводы этой работы совпадают с выводами [6].

Авторы [14] рассматривают два сценария, которые могут привести к крупномасштабному вертикальному водообмену в Среднем и Южном Каспии.

Первый сценарий предполагает развитие вертикальной конвекции, достигающей дна, в Среднем Каспии в особо суровые зимы на границе кромки льда при формировании anomalно плотных вод за счет дополнительного осолонения при ледообразовании. При этом поступление “молодых” вод в глубинные слои Среднего Каспия сопровождается вентиляцией глубинных вод Южного Каспия за счет перетока “старых” среднекаспийских глубинных и промежуточных вод через Апшеронский порог. Этот сценарий не объясняет того факта, что кажущийся возраст глубинных вод, оцененный на основе распределения CFC-11, CFC-12, ^3H и ^3He , в Среднем и Южном Каспии практически одинаков.

Это побудило авторов [14] предположить, что возможен второй сценарий — одновременное крупномасштабное вертикальное перемешивание вод в обеих котловинах в 1976 г. с поступлением “молодых” поверхностных вод

в глубинные слои без заметного водообмена между котловинами.

Мы попытаемся оценить достоверность этих сценариев с учетом доступных гидрометеорологических данных и особенностей датирования вод с помощью используемых преходящих трассеров.

В первую очередь рассмотрим, в какой мере гидрометеорологические условия в Северном Каспии в 1976 г. соответствовали первому сценарию вертикального водообмена — развитию крупномасштабной гравитационной конвекции на исходе зимы. На рис. 1 представлены среднемесячные значения температуры поверхностного слоя воды в январе, феврале и марте в 1970-е гг. на ст. Тюлений в Северном Каспии [3]. Зримо выделяется anomalно низкая температура воды в марте 1976 г. по сравнению со смежными годами на фоне малой временной изменчивости температуры воды в январе и феврале.

Такова же картина изменения среднемесячных значений температуры воды и на другой станции Северного Каспия — Лагань [3].

По существу, изменение среднемесячных значений температуры воды в марте в Северном Каспии в период 1972–1980 гг. отражает соответствующий годовой ход среднемесячной температуры воздуха в Астрахани, для которого также характерна anomalно низкая температура в марте 1976 г. (рис. 2) [2]. Отметим, что в первую декаду марта средняя температура в Астрахани в 1976 г. составляла -7.5°C . Anomalно низка среднемесячная температура воздуха в марте 1976 г. в Махачкале — $+1.4^\circ\text{C}$ при среднемесячном значении за базовый период 1961–1990 гг. $+4.6^\circ\text{C}$ [2].

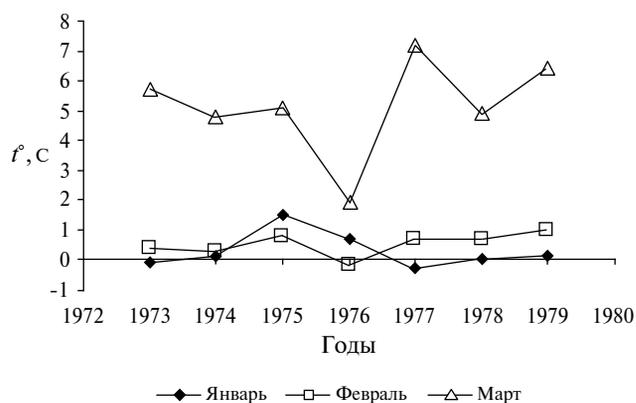


Рис. 1. Изменение среднемесячных температур воды на ст. Тюлений, Северный Каспий [3].

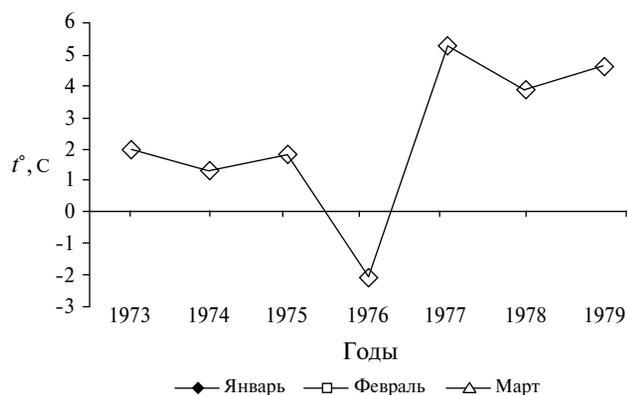


Рис. 2. Изменение среднемесячных температур воздуха марта в Астрахани в 1973–1979 гг.

Полагаем, что приведенные данные — достаточно убедительное свидетельство возможности реализации крупномасштабного вертикального водообмена в Среднем Каспии, для которого, по мнению авторов, определяющий фактор — отрицательная температура воздуха в марте 1976 г. в районе Северного и Среднего Каспия, способствующая дополнительному осолонению вод у кромки ледяного покрова. В пользу этого сценария также свидетельствуют данные о повышенном содержании растворенного кислорода в глубинных водах Среднего Каспия в 1976 г., которые авторы [14] приводят, ссылаясь на работу [12]. По Южному Каспию таких данных нет.

Годовой ход среднемесячных значений температуры поверхностной воды в Среднем и Южном Каспии существенно отличается от того, что наблюдается в Северном Каспии (рис. 3, 4). Изменчивость среднемесячной температуры воды в марте на станциях Среднего

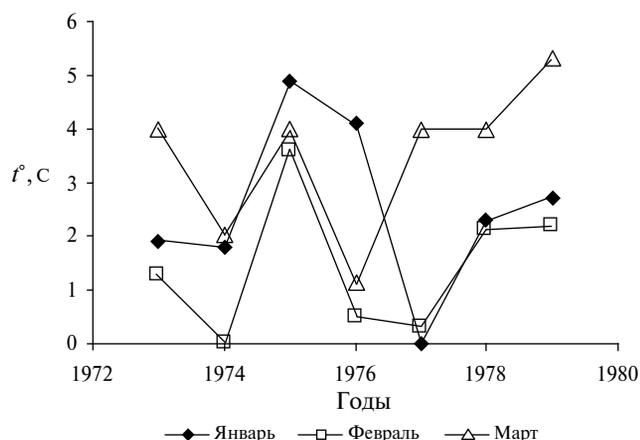


Рис. 3. Изменение среднемесячных температур воды на ст. Изберг, Средний Каспий в 1973–1979 гг. [3].

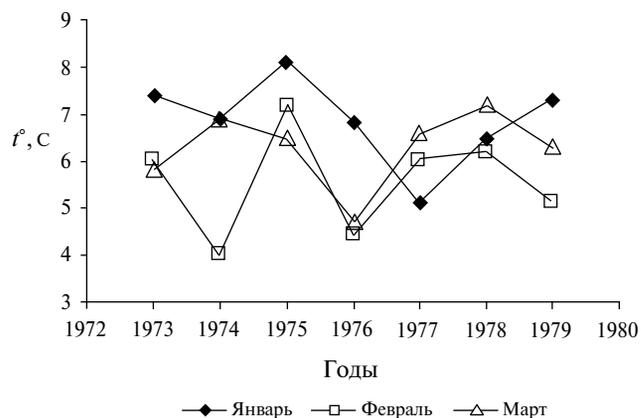


Рис. 4. Изменение среднемесячных значений температуры воды на ст. Нефтяные Камни, Южный Каспий в 1973–1979 гг. [3].

и Южного Каспия не выглядит аномальной на фоне изменчивости среднемесячной январской и февральской температуры воды в период 1973–1980 гг.

Как упоминалось ранее, основной довод в пользу второго сценария — практическое совпадение возраста глубинных вод (ниже 500 м) Среднего и Южного Каспия, в то время как при реализации первого сценария возраст глубинных вод Южного Каспия должен превышать соответствующий возраст вод Среднего Каспия, поскольку в этом случае в Южный Каспий перетекают более “старые” воды из Среднего Каспия. В связи с этим рассмотрим особенности датирований вод с помощью переходящих трассеров.

Оценка возраста вод этим методом предполагает, что единственный источник поступления трассеров в морскую среду — атмосфера, после чего не должно быть нового контакта с атмосферой и взаимодействия с водами иного происхождения. При глубинном водообмене в Южном Каспии по первому сценарию этот критерий не выдерживается. В этом случае в глубинные слои поступают не только локальные поверхностные воды в результате зимнего охлаждения, но и среднекаспийские воды с совершенно иной историей пребывания в них трассеров. Подъем и перетекание среднекаспийских вод через Апшеронский порог в Южный Каспий сопровождается турбулентным перемешиванием вод разных горизонтов, имеющих разную температуру, соленость и содержание растворенных газов. Этот процесс поразному распределяет трассеры при попадании в слой зимней конвекции.

Содержание He в глубинных водах значительно превышает его содержание в поверхностном слое, поскольку терригенный гелий — основной источник этого элемента в морской среде. Попадая в поверхностные горизонты, глубинные воды Среднего Каспия теряют He, так как здесь его содержание контролируется равновесной растворимостью атмосферного He. Этот процесс сопровождается неконтролируемыми потерями радиогенного ^3He , поскольку ^3He менее растворим в морской воде в равновесных условиях, чем основной изотоп этого элемента — ^4He [17], что приводит к обогащению легким изотопом газовой фазы. Концентрация ^3H в поверхностном слое в процессе перетока вод через Апшеронский порог по первому сценарию меняется только в процессе перемешивания вод разных горизонтов. Таким образом, можно утверждать, что перетекание глубинных вод Среднего Каспия в Южный Каспий происходит без потери ^3H и с уменьшением содержания радиогенного ^3He . Это, в свою очередь, ставит под сомнение корректность оценки возраста вод в Южном Каспии с помощью данных трассеров. Оценка возраста глубинных вод Южного Каспия, основанная на существовании единственного источника поступления трассера в водоем, в этом случае некорректна.

Достоверность сценариев крупномасштабного вертикального водообмена может быть оценена на основе имеющихся в литературе данных о содержании ^3H в поверхностных водах Каспийского моря. В работе [5] на основе собственных определений содержания ^3H в поверхностных водах Среднего Каспия в 1975–1977 гг. и результатов режимных наблюдений за концентрацией ^3H в поверхностной воде Южного Каспия с 1960 по 1970 г. [13] выведена зависимость, описывающая уменьшение концентрации ^3H в поверхностной воде Каспийского моря в период с 1966 по 1977 г.

$$C_{\text{тр}} = 159.2e^{-0.129t} \quad (r = 0.94), \quad (1)$$

$C_{\text{тр}}$ — концентрация ^3H через период времени t (годы), в 1966 г. при этом $t = 0$.

В соответствии с (1) концентрация ^3H в поверхностной воде Каспийского моря в 1976 г. оценивается величиной 44 ТЕ (одна ТЕ соответствует одному атому ^3H на 10^{18} атомов ^1H).

При условии полного отсутствия водообмена в глубинных ($h \geq 500$ м) водах Среднего и Южного Каспия в предположении имевшей место в 1976 г. полномасштабной вертикальной

конвекции, достигшей дна в обеих котловинах, концентрация ^3H в этой водной массе должна была меняться только за счет радиоактивного распада по формуле

$$C_0 = C_t e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

C_0 — начальная концентрация ^3H , C_t — концентрация в момент времени t , λ — постоянная распада, равная 0.05625 год $^{-1}$.

Используя в качестве C_t средние концентрации ^3H в глубинных водах Среднего и Южного Каспия в 1996 г. [5] ($t = 20$ лет), можно оценить начальную концентрацию ^3H в поверхностной воде моря в 1976 г. — C_0 в формуле (2).

В глубинных водах Среднего Каспия $C_t = 12$ ТЕ, чему соответствует $C_0 = 47$ ТЕ, для Южного Каспия соответствующие величины равны 7.6 и 23 ТЕ.

Приведенные расчеты показывают, что C_0 в формуле (2) для глубинных вод Среднего Каспия (47 ТЕ) близка к вычисленной по (1) концентрации ^3H в поверхностных водах Каспийского моря в 1976 г. (44 ТЕ) и соответствует сценарию крупномасштабного вертикального водообмена в Среднем Каспии в этот год. В то же время C_0 для глубинных вод Южного Каспия (23 ТЕ) существенно меньше, чем концентрация ^3H в поверхностных водах Каспийского моря в 1976 г., что подразумевает наличие в их составе более “старых” вод. Эти результаты также вписываются в первый сценарий крупномасштабного вертикального водообмена.

Перетекание растворенных фреонов из Среднего Каспия в Южный в процессе водообмена по первому сценарию также сопровождается изменением концентраций этих трассеров. Турбулентное перемешивание “старых” глубинных среднекаспийских вод с низким содержанием хлорфторуглеродов с поверхностными водами уменьшает их концентрацию в водах, перетекающих в глубинные слои Южного Каспия. С другой стороны, высокая концентрация хлорфторуглеродов в поверхностных горизонтах моря будет поддерживаться притоком хлорфторуглеродов из атмосферы. Следует иметь в виду, что поступление хлорфторуглеродов в морскую среду на фоне хронологической зависимости от их содержания в атмосфере имеет сезонную изменчивость, поскольку растворимость хлорфторуглеродов в воде сильно возрастает с уменьшением температуры воды.

Полагаем, что вышеизложенное достаточно убедительно свидетельствует в пользу первого

сценария авторов [14], который предусматривал развитие крупномасштабной, достигшей дна гравитационной конвекции в Среднем Каспии в 1976 г. на границе кромки льда, сопровождаемой вентиляцией глубинных вод Южного Каспия за счет перетока “старых” среднекаспийских глубинных и промежуточных вод через Апшеронский порог, сформировавшей устойчивую вертикальную структуру глубинных водных масс Каспийского моря на два десятилетия.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ результатов международных изотопно-геохимических исследований в 1994–1996 гг. в Каспийском море с учетом доступных гидрометеорологических данных и особенностей датирования вод с помощью используемых преходящих трассеров (CFC-11, CFC-12, ^3H и ^3He) позволил оценить их вклад в выявление особенностей формирования вертикальной структуры вод моря в период подъема его уровня, продолжавшегося с середины 1970-х до середины 1990-х гг. Вертикальное распределение преходящих трассеров характеризуется однородным их содержанием в глубинных водных массах ($h > 500$ м). Распределение изотопных и химических трассеров в водных массах Каспийского моря позволило сделать вывод, что после крупномасштабной гравитационной конвекции в Среднем Каспии, вызванной аномальным охлаждением поверхностных вод в Северном Каспии в конце зимы 1976 г., сформировалась устойчивая структура глубинных водных масс (> 500 м) вплоть до полного прекращения вентиляции глубинных вод в Среднем и Южном Каспии до середины 1990-х гг. Различие процессов вертикального водообмена в Среднем и Южном Каспии (гравитационная конвекция в Среднем и турбулентное перемешивание в Южном) ограничивает возможность надежного определения возраста глубинных вод Южного Каспия на основе вертикального распределения преходящих трассеров в модели с единственным источником поступления преходящих трассеров в водные массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брезгунов В.С., Ферронский В.И.* Природный тритий как индикатор перестройки вертикальной структуры водных масс Каспийского моря при колебаниях его уровня // *Вод. ресурсы.* 2005. Т. 32. № 4. С. 406–409.
2. Данные климатического мониторинга // <http://seakc.meteoinfo.ru/actuals>.
3. КАСПКОМ. Каталог температуры воды Каспийского моря // <http://www.caspc.com/index.php?razd=proj&lang=1>.
4. *Косарев А.Н., Никонова Р.Е.* Современные колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия, тенденции // *Вестн. Каспия.* 2006. № 4. С. 40–59.
5. *Романов В.В.* Применение природного трития для изучения перемешивания морских и речных вод // *Вод. ресурсы.* 1983. № 1. С. 130–144.
6. *Тужилкин В.С., Гончаров А.В.* О вентиляции глубинных вод Каспийского моря // *Исследование океанов и морей.* Тр. ГОИН. Вып. 211. 2008. С. 43–64.
7. *Тужилкин В.С., Косарев А.Н.* Многолетняя изменчивость вертикальной термохалинной структуры вод глубоководных частей Каспийского моря // *Вод. ресурсы.* Т. 31. № 4. 2004. С. 414–421.
8. *Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Архипкин В.С., Никонова Р.Е.* Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата. // *Вест. Моск. ун-та. Сер. 5, География.* 2011. № 5. С. 62–71.
9. *Ферронский В.И., Брезгунов В.С., Власова Л.С., Поляков, В.А., Романов В.В., Фрелих К., Ружанский К.* Исследование водообменных процессов в Каспийском море на основе изотопных и океанографических данных // *Вод. ресурсы.* 2003. Т. 30. № 1. С. 15–28.
10. *Beining P., Roether W.* Temporal evolution of CFC 11 and CFC 12 concentrations in the ocean interior // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 16455–16464.
11. *Froehlich K., Imboden D., Kipfer R., Rozansky K.* Dynamics of the Caspian Sea: Preliminary results of isotope studies // *Proc. Symp. IAEA: Isotope Techniques in the Study of Environ. Change.* Vienna, 1998. P. 249–264.
12. *Kosarev, A.N., Yablonskaya, E.A.* The Caspian Sea. The Hague: SPB Acad. Publ., 1994. 274 p.
13. *Michel R.L., Suess H.E.* Tritium in the Caspian Sea // *Earth and Planet Sci. Lett.* 1978. V. 39. № 3. P. 309–312.
14. *Peeters F., Kipfer R., Achermann D., Hofer M., Aeschbach-Hertig W., Beyerle U., Imboden D.M., Rozanski K., Fröhlich K.* Analysis of deep-water exchange in the Caspian Sea based on environmental tracers // *Deep Sea Res.* 2000. V. 47. P. 621–654.
15. *Tsimitri C., Rockel B., Wuest A., Budnev N.M., Sturm M., Schmid M.* Drivers of deep-water renewal events observed over 13 years in the South Basin of Lake Baikal. // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2015. V. 120. P. 1508–1526.
16. *Waugh D.W., Vollme M.K., Weiss R.F., Haine T.W.N., Hall T.M.* Transit time distributions in Lake Issyk-Kul // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 24. P. 84-1–84-4.
17. *Weiss R.F.* Helium isotope effect in solution in water and seawater // *Sci.* 1970. V. 168. P. 247–248.

SPECIALTY OF VERTICAL WATER EXCHANGE OF THE CASPIAN SEA ON THE BASIS OF DISTRIBUTION OF TRANSIENT TRACERS

© 2019 V. S. Brezgunov^{1,*}

¹Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences

Russia 119991 Moscow

**e-mail: brez@iwp.ru*

Received: 01.02.2018

Revised version received: 19.02.2019

Accepted: 11.04.2019

The analysis of the reliability of different scenarios for the formation of the vertical structure of the waters of the Caspian Sea, obtained from the distribution of transient tracers (CFC-11, CFC-12, ³H and ³He) at the deep-water stations of the Middle and Southern Caspian within the framework of international integrated isotope-geochemical studies during the maximum sea level rise in 1995–1996. Taking into account the available hydrometeorological data and the characteristics of water dating using transient tracers, it was concluded that after large-scale gravitational convection in the Middle Caspian caused by anomalous cooling of surface waters in the Northern Caspian at the end of the winter of 1976, a structure of water masses was formed that excluded deep water ventilation in the Middle and South Caspian Sea until the mid-90s.

Keywords: Caspian Sea, vertical water exchange, transient tracers.

DOI: 10.31857/S0321-0596465496-502