

Динамика зоны апвеллинга у восточного побережья Каспия в сезонном цикле (май – сентябрь) по спутниковым среднемноголетним температурным данным (2003–2019)

А. И. Гинзбург¹, А. Г. Костяной^{1,2,3}, Н. А. Шеремет¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mails: *ginzburg@ocean.ru, kostianou@gmail.com, sheremet@ocean.ru*

² *Московский университет им. С. Ю. Витте, Москва, 115432, Россия*

³ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

Исследование динамики зоны апвеллинга у восточного побережья Каспия и выявление характерных месяцев образования определяющих её мезомасштабных элементов циркуляции вод выполнено с использованием инфракрасных спутниковых данных MODIS-Aqua, доступных через базу данных NASA Giovanni on-line data system. Анализировались карты температуры поверхности Каспия (ТПМ) с месячным осреднением для каждого из пяти месяцев сезона апвеллинга (май – сентябрь) 17-летнего периода 2003–2019 гг. и среднемноголетние (осреднённые за 17 лет) карты ТПМ для каждого из этих пяти месяцев. Установлено, что положение северной границы зоны апвеллинга, меняющейся на среднемноголетних картах ТПМ от 44,3° с. ш. в июне – июле до 45° с. ш. в августе – сентябре, зависит: 1) от вторжения (преимущественно в июне – июле) струй тёплых вод из Северного Каспия в Средний Каспий вдоль западного побережья п-ова Тюб-Караган, исключая локальный апвеллинг; 2) характерного для августа – сентября образования на фронте апвеллинга у побережья Тюб-Карагана циклонических вихрей, переносящих трансформированные воды апвеллинга на запад и юго-запад на расстояние до 100 км. Смещение южной границы зоны на север с 39,4° с. ш. в мае и июне на 40–40,6° с. ш. в июле – сентябре и областей минимальной температуры с 41–42° с. ш. в июне на ~42,6–43,5° с. ш. в июле – сентябре определяется вторжением языков южнокаспийских вод в Средний Каспий вдоль побережья в пределах примерно 50-метровой изобаты, наиболее частым в июле – октябре (при восточных ветрах). Сравнение среднемноголетних полей ТПМ (спутниковые данные 2003–2019 гг.) с климатическими в атласе А. Н. Косарева и В. С. Тужилкина (1995) показало их неплохое соответствие для июня – августа и существенное различие для сентября (смещение в атласе области минимальной температуры на север с 41–42° с. ш. в июне к 43–45° с. ш. в сентябре). Возможные причины такого расхождения обсуждаются.

Ключевые слова: Каспийское море, апвеллинг у восточного побережья, температура поверхности моря, среднемноголетнее поле температуры, среднемесячное поле температуры, межгодовая изменчивость, глобальное потепление, спутниковые данные

Одобрена к печати: 27.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-215-226

Введение

Сезонный апвеллинг (подъём холодных нижележащих вод к поверхности) вдоль восточного побережья Среднего и Южного Каспия — хорошо известная особенность динамики Каспийского моря в тёплый сезон (Архипкин, 1990, 1996; Косарев, 1975; Tuzhilkin, Kosarev, 2005). Из-за существенных температурных контрастов во фронтальной зоне апвеллинга (до 10–12 °С в очагах апвеллинга в прибрежной зоне шириной от 5 до 30 км) он хорошо проявляется в поле температуры поверхности моря (ТПМ) как при инструментальных измерениях в ходе экспедиционных исследований или на гидрометеостанциях (ГМС) (Архипкин, 1990; Гидрометеорология..., 1992; Елтай и др., 2019; Косарев, 1975; Косарев, Тужилкин, 1995, 2000), так и на спутниковых инфракрасных (ИК) изображениях (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015; Kostianou et al., 2019; Sur et al., 2000).

Хотя сам факт существования зоны сезонного апвеллинга у восточного побережья Каспия давно и хорошо известен, ряд вопросов, касающихся её динамики и определяющих

её факторов, изучены недостаточно. Это, например, смещение границ зоны апвеллинга вдоль побережья и изменение локальной ширины зоны в период с мая по сентябрь, изменение положения в этот период центров апвеллинга — областей наименьшей температуры, различия в очертании зоны апвеллинга и его интенсивности в периоды изменения режима атмосферной циркуляции над Каспием и локальной горизонтальной циркуляции вод моря, а также в периоды падения/подъёма уровня моря.

Частые синоптические события апвеллинга вдоль восточного побережья Каспия, приводящие к существованию здесь устойчивой сезонной аномалии температуры, определяют изменчивость локальной зоны апвеллинга на временных масштабах в несколько дней (см. спутниковые изображения в работах (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011)). Даже среднемесячные поля ТПМ определённого месяца в разные годы существенно различаются вследствие межгодовой изменчивости апвеллинга. Поэтому наилучшим «продуктом», дающим представление о характерных для каждого месяца сезонного цикла структуре и пространственных параметрах зоны апвеллинга, являются осреднённые за ряд лет среднемесячные поля ТПМ.

Известны, начиная с исследований В. С. Самойленко 1950-х и 1960-х гг. (см. работу (Косарев, Тужилкин, 1995)), среднемноголетние или климатические поля ТПМ Каспийского моря, построенные на основе существовавших на определённый момент массивов инструментальных измерений и данных ГМС или спутниковых наблюдений. Однако приведённые в опубликованных работах распределения ТПМ, на которых проявляется апвеллинг, относятся в большинстве случаев к одному из летних месяцев, например к августу (Гидрометеорология..., 1992; Гинзбург и др., 2004; Косарев, 1975; Косарев, Тужилкин, 2000; Попов, 2004; Tuzhilkin, Kosarev, 2005) или июлю (Мамедов, 2000). В монографии Г. Н. Панина (1987) и атласе (Косарев, Тужилкин, 1995) приведены ежемесячные климатические поля ТПМ Каспия с января по декабрь, что позволяет проследить динамику зоны апвеллинга в среднем в тёплый период. Однако термическая структура зон апвеллинга в этих и упомянутых выше работах при схожести в отдельные месяцы имеет и заметные различия. Так, в климатических распределениях ТПМ Панина (1987) апвеллинг в мае и июне не проявляется; отсутствуют очаги апвеллинга и в майском распределении в атласе (Косарев, Тужилкин, 1995). Очаги апвеллинга в августе в работе (Косарев, 1975) расположены в районе м. Бекдаш, тогда как в более поздних работах (Косарев, Тужилкин, 1995; Панин, 1987) это более северные районы (мысы Песчаный, Ракушечный и Казахский залив).

А. Н. Косаревым и В. С. Тужилкиным (1995) отмечена интересная особенность поля ТПМ на горизонте 20 м (она же хорошо заметна и на горизонте 0 м атласа): постепенное смещение области минимальных ТПМ с 41–42° с. ш. в июне к 43–45° с. ш. в сентябре. Этот же вывод повторен для ТПМ Каспия в работе (Водный..., 2016) и в Википедии. Однако такого сезонного смещения очагов апвеллинга не следует из ежемесячных распределений ТПМ в работе (Панин, 1987) и информативных спутниковых изображений 2002–2004 гг. в исследованиях (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011).

По-видимому, различия в среднемноголетних/климатических распределениях ТПМ для определённых месяцев в упомянутых работах связаны как с использованием авторами разных массивов данных, основанных на разновременных контактных измерениях разных районов с пространственным разрешением в десятки километров и с неодинаковой обеспеченностью измерениями в разные месяцы, так и с межгодовой изменчивостью интенсивности и структуры зоны сезонного апвеллинга. Климатические поля ТПМ для горизонта 0 м в атласе (Косарев, Тужилкин, 1995) основаны на массиве из 65 523 гидрологических измерений, выполненных в период с 1905 по 1994 г., с максимальным количеством измерений в 1945–1989 гг. С начала 1990-х гг. количество натуральных измерений в масштабе моря резко сократилось без перспектив его дальнейшего увеличения. Построение среднемесячных и среднемноголетних полей ТПМ в условиях ограниченного количества/отсутствия инструментальных измерений может быть основано на данных спутниковых радиометров с хорошим пространственным и временным разрешением и практически одновременным охватом измерениями всей акватории Каспия. Анализ таких карт ТПМ в зоне сезонного апвеллинга у восточного побережья Каспия с целью выявления динамики этой зоны в сезонном цикле становится предметом данной статьи.

Данные

В настоящем исследовании использованы доступные через интернет данные о ТПМ, содержащиеся в базе данных NASA Giovanni on-line data system (NASA — *англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства), основанные на ночных измерениях радиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (11 мкм) спутника Aqua с пространственным разрешением 4 км. Анализировались как карты ТПМ Каспийского моря с месячным осреднением для каждого из пяти месяцев сезона апвеллинга у восточного побережья Каспия (май – сентябрь) 17-летнего периода 2003–2019 гг. (85 карт), так и среднемноголетние (осреднённые за 17 лет) карты ТПМ для каждого из этих пяти месяцев (5 карт). Для среднемноголетних карт каждого месяца диапазон температуры карты подбирался таким образом, чтобы получить достаточно подробное поле ТПМ в зоне апвеллинга (с градациями около 0,6–0,7 °С) и определить положения очагов апвеллинга в ней. Среднемесячные карты давали представление о межгодовой изменчивости зоны апвеллинга, о месяцах наиболее частого проявления элементов мезомасштабной циркуляции, определяющих границы зоны и расстояния, на которые распространяются в западном, юго-западном или южном направлениях трансформированные воды апвеллинга.

Среднемноголетние карты ТПМ для каждого месяца (май – сентябрь) сезона апвеллинга и среднемесячные карты отдельных лет

Ниже приводятся среднемноголетние (осреднённые за 17 лет, 2003–2019 гг.) карты ТПМ для каждого месяца сезонного апвеллинга, дающие представление о характерных для этого месяца расположении и пространственных масштабах зоны апвеллинга, а также о положении очагов апвеллинга в ней. Для каждого месяца приведены и наиболее интересные среднемесячные карты ТПМ для какого-либо конкретного года в пределах рассматриваемого периода.

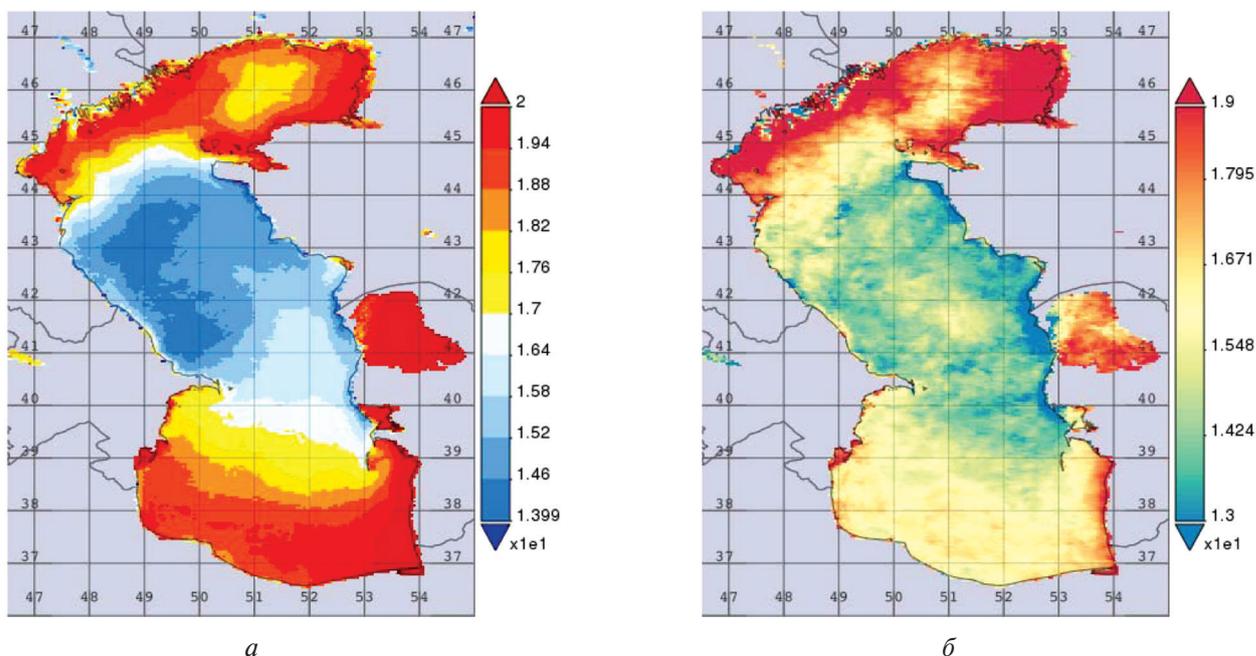


Рис. 1. Карты ТПМ для мая: *a* — среднемноголетняя (2003–2019); *б* — среднемесячная для 2003 г.

Май. В мае подъём холодных подповерхностных вод проявляется вдоль восточного побережья Среднего и отчасти Южного Каспия в узкой полосе шириной около 10 км (рис. 1а).

Апвеллинговые воды наблюдаются на участках побережья, ориентированных преимущественно с северо-запада на юго-восток (совпадающих по направлению с типичным для этого месяца северо-западным ветром): от южного побережья п-ова Тюб-Караган до 43,5° с. ш. (фрагментами), у мысов Санырлы, Суэ и Бекдаш (42,1–41,2° с. ш.) и вдоль Красноводской косы. Наиболее широкая зона апвеллинга (до 30 км) с минимальной температурой около 14 °С наблюдается у южных побережий мысов Суэ и Бекдаш.

На некоторых среднемесячных майских картах ТПМ зона апвеллинга более протяжённая. *Рисунок 1б* показывает, например, что в мае 2003 г. апвеллинг, помимо проявившихся на *рис. 1а* участков, наблюдался вдоль западного побережья п-ова Тюб-Караган, вдоль южного побережья м. Песчаный, у м. Ракушечный, вдоль южного побережья Казахского залива и вдоль всего Красноводского п-ова. Среднемесячная температура в очаге апвеллинга у м. Суэ — около 11,5 °С.

Июнь. Для июня характерна наиболее протяжённая в меридиональном направлении зона апвеллинга: от южного побережья п-ова Тюб-Караган до п-ова Челекен (44,3–39,4° с. ш., граница зоны — по изотерме 20,8 °С, *рис. 2а*). Апвеллинг у западного побережья Тюб-Карагана наблюдается редко, что связано с вторжением тёплых вод Северного Каспия в Средний вдоль западного побережья этого полуострова (см. *рис. 2б*). Иногда на среднемесячных июньских картах ТПМ заметен подъём холодных вод у западного побережья о. Огурчинский (см. *рис. 2б*). Наиболее интенсивный апвеллинг — на участках побережья от 44 до 42,6° с. ш. (м. Сагындык — северное побережье Казахского залива) и от м. Суэ (42,1° с. ш.) до 40° с. ш. Минимальная температура поверхности воды в очаге апвеллинга на среднемноголетней карте у мысов Суэ и Бекдаш (см. *рис. 2а*) составляет 18 °С, на среднемесячной июньской карте 2003 г. южнее м. Суэ и вдоль Красноводской косы (см. *рис. 2б*) — примерно 14 °С. ИК-изображение спутника NOAA-16 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований) за 26 июня 2003 г., демонстрирующее вторжение вод Северного Каспия в Средний, апвеллинг от южного побережья п-ова Тюб-Караган до о. Огурчинский и распространение трансформированных вод апвеллинга на юг до 38,4° с. ш. и в западном направлении до 50,4° в. д. в Южном Каспии, представлено на *рис. 6.22б* в книге (Лаврова и др., 2011).

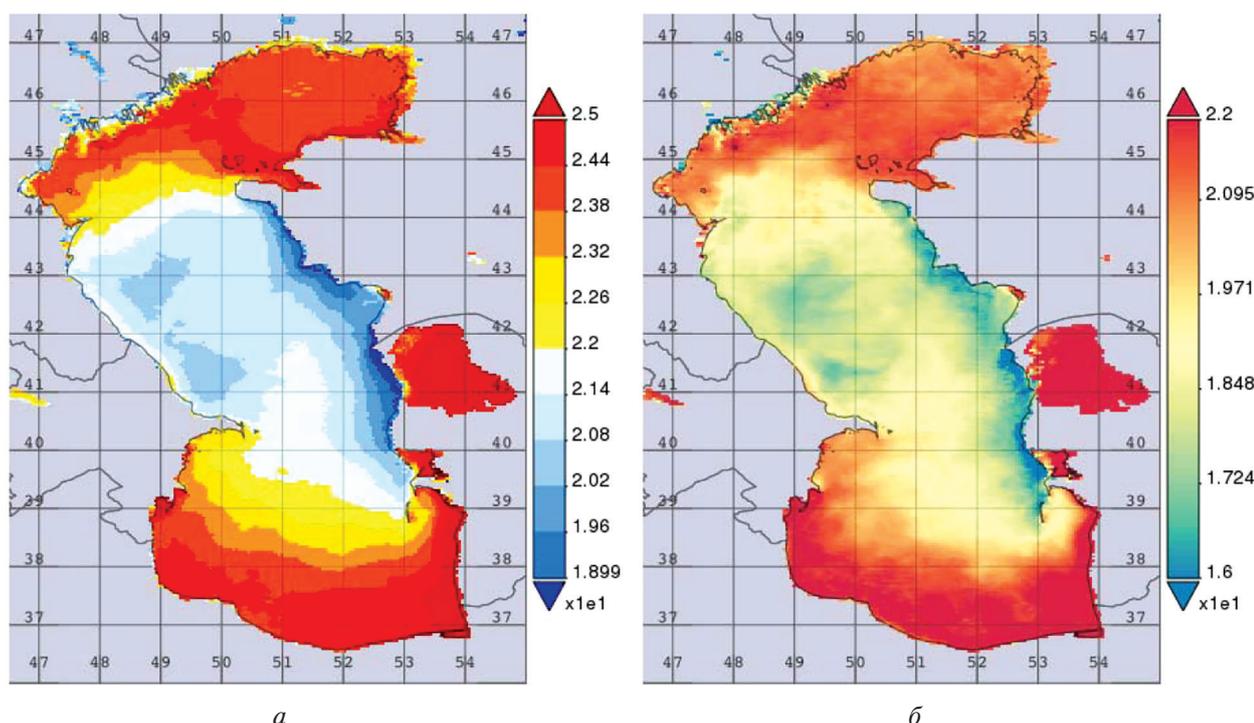


Рис. 2. Карты ТПМ для июня: *а* — среднемноголетняя (2003–2019); *б* — среднемесячная для 2003 г.

Можно заметить, что восточная граница языка тёплых вод из Южного Каспия в Средний (см. *рис. 2а*), по сравнению с её положением в мае (см. *рис. 1а*), существенно сместилась на запад.

Июль. Южная граница зоны апвеллинга на среднемноголетней июльской карте ТПМ (изотерма 24,5 °С на *рис. 3а*) смещена по сравнению с июньской на север к 40° с. ш. Область минимальной температуры (примерно 21 °С) также смещена на север и расположена на участке от южного побережья м. Песчаный до северного побережья Казахского залива, хотя минимальная ТПМ ещё наблюдается в узких полосах у мысов Суэ и Бекдаш. Заметно расширилась зона апвеллинга южнее м. Песчаный за счёт распространения трансформированных апвеллинговых вод на запад и юго-запад. Следствием их проникновения в Южный Каспий является характерная вогнутость изотерм 25,2 и 25,9 °С.

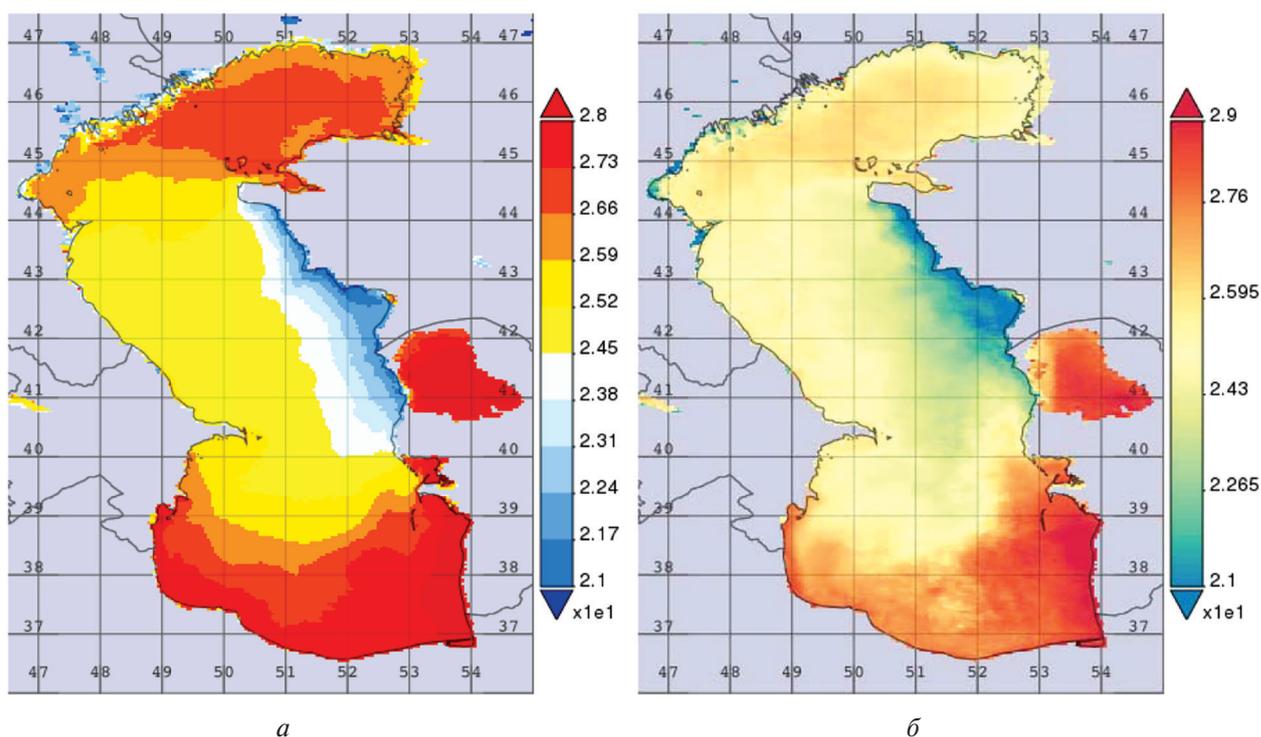


Рис. 3. Карты ТПМ для июля: *а* — среднемноголетняя (2003–2019); *б* — среднемесячная для 2014 г.

С другой стороны, на изотермах 25,9 и 26,6 °С отчётливо виден направленный на север изгиб изотерм, отражающий адвекцию тёплых южнокаспийских вод в Средний Каспий. Такие воды распространяются в основном в пределах 50-метровой изобаты, либо вдоль восточного побережья, либо слегка мористее. В последнем случае струя тёплых вод делит трансформированные воды апвеллинга на прибрежные и распространяющиеся над глубоководной частью моря.

На среднемесячной июльской карте 2014 г. (*рис. 3б*) струя южнокаспийских вод с температурой примерно 26 °С на 40° с. ш. и постепенно убывающей до 24,3 °С к её северной границе отходит от побережья на 40,7° с. ш. (южнее апвеллинг, соответственно, отсутствует) и прослеживается до 41,4° с. ш. Прибрежные воды апвеллинга с температурой примерно 22,6 °С наблюдаются на участке от южного побережья п-ова Тюб-Караган до точки отделения струи от побережья, а трансформированные воды апвеллинга западнее струи распространяются в Южном Каспии до 38,6° с. ш. на юге и 50,2° в. д. на западе. ИК-изображения спутника NOAA-16 за 03.07.2003 и 30.07.2004, демонстрирующие интенсивный апвеллинг на 40–42° с. ш. в отсутствие (или при слабой) адвекции южнокаспийских вод, представлены соответственно на *рис. 6.22в* и *6.23а* в книге (Лаврова и др., 2011).

Август. В августе южная граница зоны апвеллинга (изотерма $25,7^{\circ}\text{C}$ на *рис. 4а*) сместилась по сравнению с июльской на север примерно на $0,7^{\circ}$. Очаги апвеллинга (температура примерно 22°C) по-прежнему находятся в районе от южного побережья м. Песчаный до севера Казахского залива, у мысов Санырлы, Суэ и Бекдаш апвеллинг значительно слабее. Причина этого — частые вторжения тёплых струй южнокаспийских вод в Средний Каспий, о чём свидетельствует и более ярко выраженный (по сравнению с июльской картой ТПМ) изгиб изотерм $27,0$ и $27,7^{\circ}\text{C}$ на *рис. 4а*. На среднемесячной августовской карте 2014 г. (*рис. 4б*) такая струя с температурой примерно 28°C на 40° с. ш. и $26,6^{\circ}\text{C}$ на северном конце распространяется вдоль побережья до $42,2^{\circ}$ с. ш. (апвеллинг южнее отсутствует) и далее на северо-запад до $42,7^{\circ}$ с. ш. При этом трансформированные апвеллинговые воды доходят на $39,5$ – 40° с. ш. практически до западного побережья Южного Каспия.

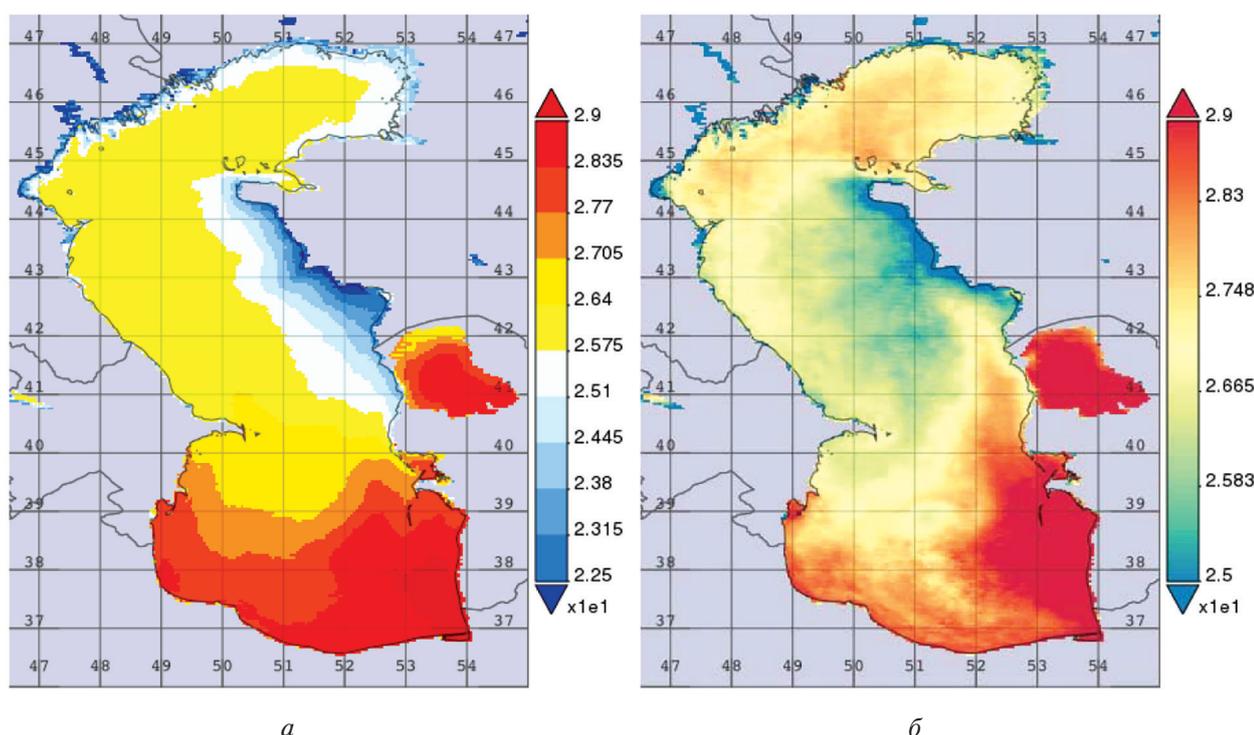


Рис. 4. Карты ТПМ для августа: *а* — среднемноголетняя (2003–2019); *б* — среднемесячная для 2014 г.

Существенным отличием августовского поля ТПМ (см. *рис. 4а*) от июльского (см. *рис. 3а*) является связанное с полем ветра и локальным вихреобразованием появление апвеллинговых вод на северном и западном побережьях п-ова Тюб-Караган (см. *рис. 4а, б*). Процесс вихреобразования у п-ова Тюб-Караган хорошо виден на августовских ИК-изображениях спутника NOAA-16 (*рис. 6.21, 6.23б, в и 6.24* в книге (Лаврова и др., 2011)).

Сентябрь. Южная граница сентябрьской зоны апвеллинга ($40,5^{\circ}$ с. ш. по изотерме $22,8^{\circ}\text{C}$) находится примерно на той же широте (немного южнее), что и в августе. Северную границу на *рис. 5а* (см. с. 221) трудно определить из-за начавшегося процесса выхолаживания Северного Каспия; основываясь на среднемесячных сентябрьских картах ТПМ, будем считать северной границей зоны 45° с. ш.

Основные отличия сентябрьского поля ТПМ от августовского, кроме естественного убывания значений ТПМ: меньшая ширина зоны апвеллинга; минимальные ТПМ в Казахском заливе наблюдаются не только вдоль северного побережья, но и западнее Кендерлинской косы; апвеллинг у мысов Суэ и Бекдаш более выражен, чем в августе. В годы интенсивной адвекции вод из Южного Каспия в Средний апвеллинг у этих мысов не наблюдается, как, например, в сентябре 2014 г. (*рис. 5б*), когда струя южнокаспийских вод распростра-

нялась на север по крайней мере до $42,2^{\circ}$ с.ш., а трансформированные воды апвеллинга в Южный Каспий — до $38,5^{\circ}$ с.ш. На ряде же среднемесячных сентябрьских карт ТПМ других лет, как и на ряде сентябрьских спутниковых ИК-изображений (рис. 6.25, 6.27в в книге (Лаврова и др., 2011)), в отсутствие адвекции южнокаспийских вод апвеллинг наблюдается вплоть до 40° с.ш. и минимальные ТПМ отмечаются иногда именно у мысов Санырлы, Суэ и Бекдаш.

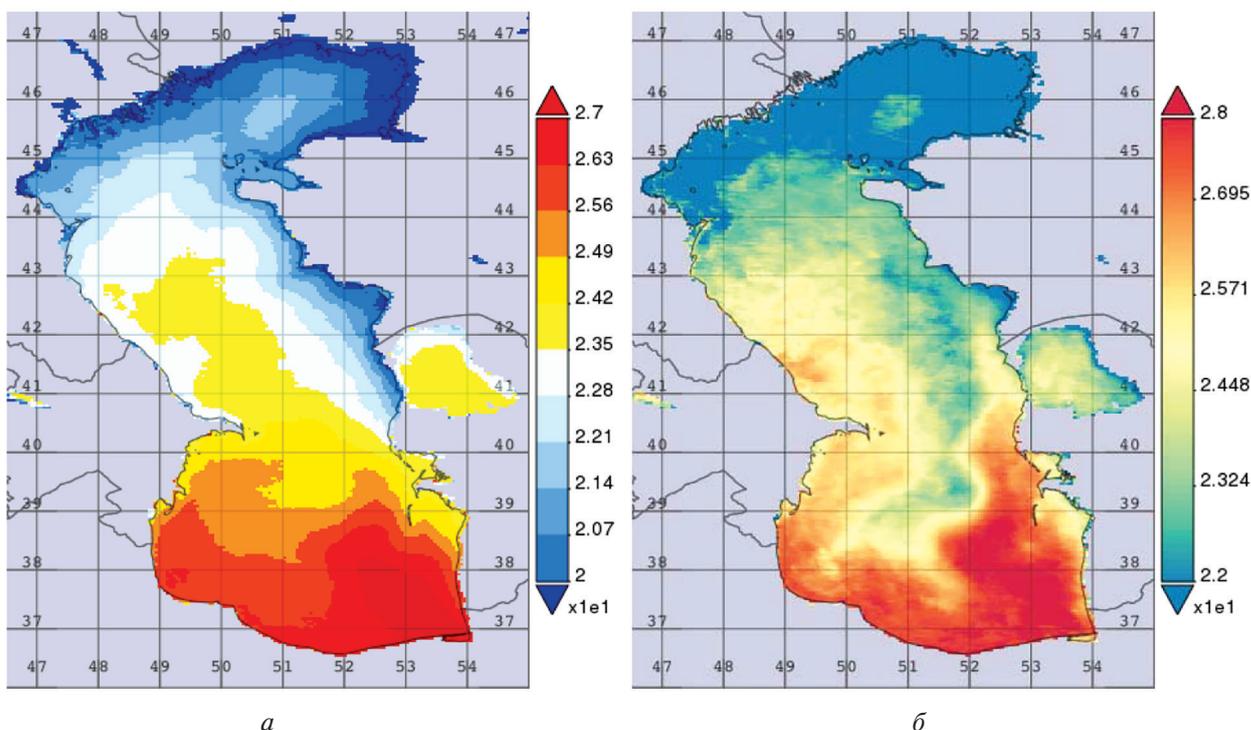


Рис. 5. Карты ТПМ для сентября: а — среднемноголетняя (2003–2019); б — среднемесячная для 2014 г.

Апвеллинг вдоль северного и западного побережий п-ова Тюб-Караган — также нередкое явление в сентябре (см. ИК-изображение на рис. 6.25 в книге (Лаврова и др., 2011)).

Обсуждение и выводы

Анализ среднемноголетних и среднемесячных (май–сентябрь, 2003–2019 гг.) карт ТПМ в зоне прибрежного апвеллинга у восточного побережья Каспия позволил проследить характерные для этой зоны изменения границ в меридиональном и зональном направлениях и смещение положения очагов апвеллинга в сезонном цикле, а также установить причины такого смещения с учётом полученной информации о месяцах наиболее частого проявления элементов мезомасштабной циркуляции вод моря, влияющих на протяжённость зоны апвеллинга вдоль берега. Сведения о границах вдольбереговой протяжённости зоны апвеллинга в сезонном цикле и соответствующем положении очагов апвеллинга, полученные по спутниковым данным и (для сравнения) из атласа (Косарев, Тужилкин, 1995), сведены в *таблицу*.

Заметим, что рассматриваемый нами временной интервал 2003–2019 гг. соответствует в основном периоду падения уровня Каспия (Гинзбург, Костяной, 2018), когда, согласно работам (Выручалкина и др., 2020; Косарев, Тужилкин, 2000), над Каспием преобладают ветры восточных румбов. Однако, по мнению Косарева и Тужилкина (2000), это сказывается на уменьшении интенсивности апвеллинга, а не на конфигурации температурного поля зоны апвеллинга.

Положение северной границы зоны апвеллинга на среднемноголетних картах ТПМ, как следует из *рис. 1а–5а* и *таблицы*, меняется в пределах 44,3–45,0° с. ш., что определяется наличием или отсутствием апвеллинга у западного и северного побережий п-ова Тюб-Караган. Оно, в свою очередь, зависит от локального ветра и особенностей локальной мезомасштабной циркуляции вод. Один из таких мезомасштабных процессов — вторжения струеподобных тёплых вод из Северного Каспия в Средний, распространяющихся вдоль западного побережья п-ова Тюб-Караган и исключают локальный апвеллинг (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011). Такие вторжения имеют место преимущественно в июне и/или июле (часто при западных ветрах над Северным Каспием и северо-западных над Средним), что объясняет положение северной границы зоны апвеллинга на среднемноголетних картах ТПМ в июне и июле примерно на 44,3° с. ш. (см. *рис. 2а* и *3а*). В мае, по-видимому, локальное поле ветра неблагоприятно для развития апвеллинга. По свидетельству А. Г. Елтая с коллегами (2019), повторяемость апвеллинга в районе Форт-Шевченко в годичном цикле минимальна именно в мае.

Положения границ зоны сезонного апвеллинга и области с наименьшими температурами по спутниковым среднемноголетним данным и данным атласа (Косарев, Тужилкин, 1995)

Месяц	По спутниковым данным	По данным атласа (Косарев, Тужилкин, 1995)
Июнь	44,3–39,4° с. ш. (по изотерме 20,8 °С, см. <i>рис. 2а</i>); область с $T_{\min} < 19,0$ °С — 42,1–41° с. ш.	43,1–40° с. ш. (по изотерме 20 °С) и на южном побережье Тюб-Карагана (22 °С); область с $T_{\min} < 18,0$ °С — 42,8–40,7° с. ш.
Июль	44,3–40° с. ш. (по изотерме 24,5 °С, см. <i>рис. 3а</i>); область с $T_{\min} < 21,7$ °С — 43,2–42,6° с. ш.	44,4–40,5° с. ш. (по изотерме 23 °С); область с $T_{\min} < 21,7$ °С — 43,2–42,6° с. ш.
Август	44,7–40,6° с. ш. (по изотерме 25,7 °С, см. <i>рис. 4а</i>); область с $T_{\min} < 22,5$ °С — 43,5–42,8° с. ш.	45,0–40,5° с. ш. (по изотерме 24 °С); область с $T_{\min} < 21,0$ °С — 43,5–42,5° с. ш.
Сентябрь	~45–40,5° с. ш. (по изотерме 22,8 °С, см. <i>рис. 5а</i>); область с $T_{\min} < 20,0$ °С — 43,2–42,5° с. ш.	42,8–40,7° с. ш. с $T_{\min} < 20,0$ °С; 45,0–43,3° с. ш. с $T_{\min} < 16,0$ °С

Второй динамический процесс, влияющий на протяжённость зоны апвеллинга у п-ова Тюб-Караган в зональном и меридиональном направлениях — вихреобразование у северо-западного и юго-западного участков побережья полуострова, отделение образовавшихся циклонов с диаметрами примерно 20 км от побережья и распространение трансформированных вод апвеллинга на запад и юго-запад на расстояние до 100 км (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011). Эта особенность циркуляции вод характерна для августа (преимущественно) и сентября при преобладающих северных и северо-восточных ветрах (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011), что отражается на среднемноголетней августовской карте (см. *рис. 4а*).

Положение южной границы зоны апвеллинга на среднемноголетних картах ТПМ меняется от 39,4° с. ш. в июне до 40,6° с. ш. в августе. Смещение этой границы на север в июле–сентябре относительно её положения в мае и июне определяется вторжением тёплых и более солёных южнокаспийских вод в Средний Каспий, которое наиболее часто наблюдается в июле–октябре при восточных ветрах (Гинзбург и др., 2006). Рекордным по распространению таких вод на север (до 42,7° с. ш. в августе, см. *рис. 4б*) за время наблюдения в три месяца рассматриваемого периода (июль–сентябрь) оказался 2014 г. (см. *рис. 3б, 4б, 5б*).

Заметим, что хорошо различимые на *рис. 3а–5а* изгибы изотерм примерно на 52,5° в. д. в Южном Каспии, соответствующие вторжениям южнокаспийских вод в Средний Каспий, не находят отражения в известных климатических температурных полях Каспия, построенных по данным инструментальных измерений с низким пространственным разрешением. Эти узкие языки южнокаспийских вод, распространяющихся вдоль побережья в пределах

примерно 50-метровой изобаты в Средний Каспий, не рассматривались ранее и при обсуждении сезонной циркуляции Каспия. Лишь в недавней работе (Дьяконов, Ибраев, 2019), где с использованием численной модели общей циркуляции Каспийского моря с высоким пространственным разрешением (примерно 2 км для описания мезомасштабной структуры течений) реконструирована циркуляция Каспия в 2003 г., получено усиление северного течения вдоль изобат 10–60 м восточного шельфа с середины июля по октябрь (при преобладающих ветрах восточных румбов), проявляющееся в виде языка тёплых вод на ИК-изображениях (Гинзбург и др., 2006; Дьяконов, Ибраев, 2019; Лаврова и др., 2011).

Выполненное сравнение основных характерных черт среднесезонных полей ТПМ с соответствующими климатическими распределениями температуры на горизонте 0 м в атласе (Косарев, Тужилкин, 1995) показало (см. *таблицу*) их неплохое соответствие для июня – августа (в майском поле ТПМ в атласе апвеллинг не проявляется). Более высокие (на $\sim 1\text{--}1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) значения ТПМ на границе зоны апвеллинга по спутниковым данным связаны, скорее всего, с продолжающимся потеплением Каспийского моря (Гинзбург, Костяной, 2018), а более высокие (примерно на $1\text{--}1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) значения минимальных температур — с меньшей интенсивностью апвеллинга и/или потеплением Каспия. Однако поля ТПМ для сентября в районе Тюб-Карагана по спутниковым данным и данным атласа существенно различаются. Обширная область круглой формы с диаметром примерно 200 км, центром к юго-западу от юго-западного участка побережья Тюб-Карагана, наружной изотермой $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ и внутренней $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сентябрьском поле атласа вызывает предположение, что инструментальные измерения в сентябре в разные годы были выполнены в зоне повышенного циклогенеза, часто наблюдаемого в августе – сентябре у п-ова Тюб-Караган (см. выше). Однако тот факт, что они нашли столь яркое отражение в климатическом сентябрьском поле температуры, означает, что образования циклонов и их распространение от берега были в период активных инструментальных измерений (1945–1989), на которых основан атлас 1995 г., довольно частыми и часто регистрировались. Заметим, что через центр этой области проходит один из вековых гидрологических разрезов от о. Чечень до п-ова Мангышлак (Косарев, Тужилкин, 1995).

Причины столь различного сентябрьского распределения ТПМ в разные периоды времени неизвестны. Возможно, с 1990-х гг. существенно изменилось поле ветра. По данным работ (Выручалкина и др., 2020 ; Косарев, Тужилкин, 2000; Серых, Костяной, 2020), в периоды падения уровня моря в среднем преобладают восточные ветры, в периоды роста — северные ветры, благоприятные для апвеллинга (однако период активных инструментальных измерений 1945–1989 гг. охватывал периоды и падения уровня Каспия, и его роста, см. работы (Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015)). Наблюдения на метеостанциях казахстанской части восточного побережья Каспия (Елтай, 2019) свидетельствуют об уменьшении среднегодовой скорости ветра в последние десятилетия (на 40 % в 1993–2018 гг. по сравнению с 1922–1950 гг. в Форт-Шевченко). Этот вопрос требует дополнительного изучения. Однако отсутствие подобной области со столь низкими температурами $16\text{--}19\text{ }^{\circ}\text{C}$ на сентябрьском среднесезонном распределении 2003–2019 гг. (см. *рис. 5а*), основанном на современных спутниковых измерениях с существенно лучшим пространственным и временным разрешением, свидетельствует о том, что вывод о постепенном смещении области минимальной температуры на север с $41\text{--}42^{\circ}$ с. ш. в июне к $43\text{--}45^{\circ}$ с. ш. в сентябре (Косарев, Тужилкин, 1995) к рассматриваемому нами периоду 2003–2019 гг. неприменим, и на этот результат Косарева и Тужилкина (1995) не стоит ссылаться без указания временного периода, для которого он был получен.

А. И. Гинзбург и Н. А. Шеремет выполняли исследование в рамках проекта Госбюджета № 149-2019-0004 «Механизмы формирования циркуляционных структур Мирового океана: ключевые процессы в пограничных слоях и их роль в динамике океана на основе экспедиционных исследований, дистанционного зондирования, численного и лабораторного моделирования». А. Г. Костяной — при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-77-20060 «Оценка изменчивости экологического состояния Каспийского моря в текущем столетии по данным спутникового дистанционного зондирования».

Литература

1. *Архипкин В. С.* Особенности структуры и динамики прибрежного апвеллинга в Каспийском море // Каспийское море. Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. С. 61–74.
2. *Архипкин В. С.* Гидрология прибрежного апвеллинга Черного и Каспийского морей: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. М., 1996. 22 с.
3. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз: научно-метод. пособие / под ред. Е. С. Нестерова. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
4. *Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А., Фомин В. В.* Влияние на эволюцию уровня Каспийского моря многолетних изменений режима ветра над его регионом в 1948–2017 гг. // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 230–240.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Проект «Моря». Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Ф. С. Терзиева, А. Н. Косарева, А. А. Керимова. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 359 с.
6. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г.* Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207.
7. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности Каспийского моря // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 645–659.
8. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Соловьев Д. М., Шеремет Н. А.* Фронтальная зона апвеллинга у восточного побережья Каспийского моря (спутниковые наблюдения) // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 4. С. 3–12.
9. *Дьяконов Г. С., Ибраев Р. А.* Динамика вод Каспийского моря над Апшеронским порогом в 2003 г. // Морской гидрофиз. журн. 2019. Т. 35. № 6. С. 633–645.
10. *Елтай А. Г.* Особенности ветрового режима в казахстанской части Среднего Каспия // Гидрометеорология и экология. 2019. № 1. С. 63–72.
11. *Елтай А. Г., Ивкина Н. И., Нарбаева К. Т.* Явление апвеллинга у казахстанской части Каспия // Гидрометеорология и экология. 2019. № 3. С. 17–25.
12. *Косарев А. Н.* Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: Изд-во Московского ун-та, 1975. 272 с.
13. *Косарев А. Н., Тужилкин В. С.* Климатические термохалинные поля Каспийского моря. М.: СОРБИС, 1995. 96 с.
14. *Косарев А. Н., Тужилкин В. С.* О многолетних изменениях термохалинного режима вод Каспийского моря // Научный бюл. Каспийского плавучего ун-та. 2000. № 1. С. 26–40.
15. *Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шеремет Н. А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
16. *Лебедев С. А., Костяной А. Г., Гинзбург А. И.* Динамика Каспийского моря по данным инструментальных измерений, результатам моделирования и данным дистанционного зондирования // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: материалы 3-й Международной научно-практ. конф. Майкоп, 2015. С. 146–179.
17. *Мамедов Р. М.* Изменчивость гидрофизических полей и распространение загрязнителей в Каспийском море. Баку: Изд-во «Элм», 2000. 184 с.
18. *Панин Г. Н.* Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 89 с.
19. *Попов С. К.* Моделирование климатической термохалинной структуры в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 2004. № 5. С. 76–84.
20. *Серых И. В., Костяной А. Г.* О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 96–107.
21. *Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Sheremet N. A., Soloviev D. M.* Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions // Remote Sensing of the Asian Seas / eds. V. Barale, M. Gade. 2019. P. 505–521.
22. *Sur H. I., Ozsoy E., Ibrayev R.* Satellite-derived flow characteristics of the Caspian Sea // Satellites, Oceanography and Society / ed. D. Halpern. Elsevier Oceanography Series, 63. Amsterdam: Elsevier, 2000. P. 289–297.
23. *Tuzhilkin V. S., Kosarev A. N.* Thermohaline Structure and General Circulation of the Caspian Sea Waters // The Caspian Sea Environment / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. V. 5. P. 33–57. DOI: 10.1007/698_5_003.

Dynamics of the upwelling zone near the eastern coast of the Caspian Sea in the seasonal cycle (May – September) based on satellite mean long-term temperature data (2003–2019)

A. I. Ginzburg¹, A. G. Kostianoy^{1,2,3}, N. A. Sheremet¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia
E-mails: ginzburg@ocean.ru, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru

² Witte Moscow University, Moscow 115432, Russia

³ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

The study of the dynamics of the upwelling zone near the eastern coast of the Caspian Sea and the identification of the characteristic months of formation of the mesoscale elements of water circulation that determine it were carried out using the infrared satellite data of MODIS-Aqua gathered in the NASA Giovanni on-line data system. The maps of the Caspian surface temperature (SST) with monthly averaging for each of the five months of the upwelling season (May – September) of the 17-year period 2003–2019 were analyzed, as well as multiyear average (17-year averaged) SST maps for each of these five months. It was found that the position of the northern boundary of the upwelling zone, which changes on mean long-term SST maps from 44.3° N to in June – July up to 45° N in August – September, depends on (i) the invasion (mainly in June – July) of streams of warm water from the Northern Caspian to the Middle Caspian along the western coast of the Tyub-Karagan Peninsula that excluded local upwelling, and (ii) the formation of cyclonic eddies at the upwelling front near the Tyub-Karagan coast, typical of August – September, transporting the transformed upwelling waters to the west and southwest for distances up to 100 km. Displacement of the southern border of the zone to the north from 39.4° N in May and June to 40–40.6° N in July – September and areas of minimum temperatures from 41–42° N in June to ~42.6–43.5° N in July – September is determined by the invasion of the tongues of the Southern Caspian waters into the Middle Caspian along the coast within the approximately 50-meter isobath, most often in July – October (with easterly winds). Comparison of mean long-term SST fields (satellite data for 2003–2019) with climatic SST fields in the atlas (Kosarev, Tuzhilkin, 1995) showed their good agreement for June – August and a significant difference for September (the shift in the atlas of the minimum temperature region to the north from 41–42° N in June to 43–45° N in September). Possible reasons for this discrepancy are discussed.

Keywords: Caspian Sea, upwelling near the eastern coast, sea surface temperature, mean long-term temperature field, monthly mean temperature field, interannual variability, global warming, satellite data

Accepted: 27.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-215-226

References

1. Arkhipkin V. S., Osobennosti struktury i dinamiki pribrezhnogo apvellinga v Kaspiiskom more (Features of the structure and dynamics of coastal upwelling in the Caspian Sea), In: *Kaspiiskoye more, Struktura i dinamika vod*, Moscow: Nauka, 1990, pp. 61–74.
2. Arkhipkin V. S., *Gidrologiya pribrezhnogo apvellinga Chernogo i Kaspiiskogo morey: Avtoref. diss. kand. geogr. nauk* (Hydrology of coastal upwelling of the Black Sea and Caspian Sea, Ext. abstract Cand. geogr. sci. thesis), Moscow, 1966, 22 p.
3. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* (Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecasting), Nesterov E. S. (ed.), Moscow: Triada Ltd, 2016, 378 p.
4. Vyruchalkina T. Yu., Dianskii N. A., Fomin V. V., Vliyaniye na evolyutsiyu urovnya Kaspiiskogo morya mnogoletnikh izmenenii rezhima vetra nad ego regionom v 1948–2017 gg. (Influence on the evolution of the level of the Caspian Sea of long-term changes in the wind regime over its region in 1948–2017), *Vodnye resursy*, 2020, Vol. 47, No. 2, pp. 230–240.
5. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Proekt "Morya". Tom VI. Kaspiiskoe more. Vyp. 1. Hidrometeorologicheskie usloviya* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas, Vol. 6, The Caspian Sea, Issue 1, Hydrometeorological conditions), Nesterov E. S. (ed.), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 358 p.

6. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Tendentsii izmenenii gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiiskogo morya v sovremennyi period (1990-e – 2017 gg.) (Tendencies of changes in the hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (the 1990s – 2017)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 195–207.
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' temperatury poverkhnosti Kaspiiskogo morya (Seasonal and interannual variability of the Caspian Sea surface temperature), *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 5, pp. 645–659.
8. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Soloviev D. M., Sheremet N. A., Frontal'naya zona apvellinga u vostochnogo poberezh'ya Kaspiiskogo morya (sputnikovye nablyudeniya) (Frontal zone of upwelling near the eastern coast of the Caspian Sea as inferred from satellite data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 4, pp. 3–12.
9. Diakonov G. S., Ibrayev R. A., Dinamika vod Kaspiiskogo morya nad Apsheronским порогом в 2003 г. (Dynamics of Caspian Sea waters over the Absheron sill in 2003), *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2019, Vol. 35, No. 6, pp. 633–645.
10. Yeltay A. G., Osobennosti vetrovogo rezhima v kazakhstanskoi chasti Srednego Kaspiya (Features of the wind regime in the Kazakh part of the Middle Caspian), *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2019, No. 1, pp. 63–72.
11. Yeltay A. G., Ivkina N. I., Narbayeva K. T., Yavlenie apvellinga u kazakhstanskoi chasti Kaspiya (Upwelling in the Kazakh part of the Caspian), *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2019, No. 3, pp. 17–25.
12. Kosarev A. N., *Gidrologiya Kaspiiskogo i Aral'skogo morei* (Hydrology of the Caspian and Aral Seas), Moscow: Izd. Moskovskogo universiteta, 1975, 272 p.
13. Kosarev A. N., Tuzhilkin V. S., *Klimaticheskie termokhalinnye polya Kaspiiskogo morya* (Climatic thermohaline fields of the Caspian Sea), Moscow: SORBIS, 1995, 96 p.
14. Kosarev A. N., Tuzhilkin V. S., O mnogoletnikh izmeneniyakh termokhalinnogo rezhima vod Kaspiiskogo morya (Long-term changes in the thermohaline regime of the Caspian Sea waters), *Nauchnyi byulleten' Kaspiiskogo plavuchego universiteta*, 2000, No. 1, pp. 26–40.
15. Lavrova O. Yu., Kostianoy A. G., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Ginzburg A. I., Sheremet N. A., *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Integrated satellite monitoring of Russian seas), Moscow: IKI RAN, 2011, 470 p.
16. Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Dinamika Kaspiiskogo morya po dannym instrumental'nykh izmereniy, rezul'tatam modelirovaniya i dannym distantsionnogo zondirovaniya (Dynamics of the Caspian Sea according to instrumental measurements, modeling results and remote sensing data), *Prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii: materialy 3-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Applied aspects of geology, geophysics and geoecology using modern information technologies: Proc. Conf.), Maikop, 2015, pp. 146–179.
17. Mamedov R. M., *Izmenchivost' gidrofizicheskikh polei i rasprostranenie zagryaznitelei v Kaspiiskom more* (Variability of hydrophysical fields and the spread of pollutants in the Caspian Sea), Baku: Elm, 2000, 184 p.
18. Panin G. N., *Isparenie i teploobmen Kaspiiskogo morya* (Evaporation and heat exchange of the Caspian Sea), Moscow: Nauka, 1987, 89 p.
19. Popov S. K., Simulation of climatic thermohaline circulation in the Caspian Sea, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2004, No. 5, pp. 49–56.
20. Serykh I. V., Kostianoy A. G., The links of climate change in the Caspian Sea to the Atlantic and Pacific Oceans, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020, Vol. 45, Issue 6, pp. 430–437.
21. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu., Lebedev S. A., Mityagina M. I., Sheremet N. A., Soloviev D. M., Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions, In: *Remote Sensing of the Asian Seas*, V. Barale, M. Gade (eds.), 2019, pp. 505–521.
22. Sur H. I., Ozsoy E., Ibrayev R., Satellite-derived flow characteristics of the Caspian Sea, In: *Satellites, Oceanography and Society*, D. Halpern (ed.), Elsevier Oceanography Series, 63, Amsterdam: Elsevier, 2000, pp. 289–297.
23. Tuzhilkin V. S., Kosarev A. N., Thermohaline Structure and General Circulation of the Caspian Sea Waters, In: *The Caspian Sea Environment*, A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.), Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, Vol. 5, pp. 33–57, DOI: 10.1007/698_5_003.