

## ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

УДК 556.5

### ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОСТОЯНИЯ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА КАСПИЙСКОГО МОРЯ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

© 2023 г. Е. В. Островская<sup>а</sup>, \*, Е. В. Гаврилова<sup>а</sup>, И. В. Гонтовая<sup>а</sup>,  
В. О. Татарников<sup>а</sup>, М. А. Очеретный<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Каспийский морской научно-исследовательский центр, Астрахань, Россия

\*e-mail: [eoostrovskaya@mail.ru](mailto:eoostrovskaya@mail.ru)

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 07.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Основная цель данной работы — обобщение данных многолетних наблюдений за гидрометеорологическими параметрами в Каспийском макрорегионе. Средняя годовая температура воздуха за последние 30 лет в регионе увеличилась на 1.0°C, температура поверхностного слоя воды — на 0.3°C, прослеживается значимая меридиональная неоднородность их распределения. В настоящее время суммарный речной сток в море составляет около 275 км<sup>3</sup>. В 1996–2020 гг. относительно периода 1961–1990 гг. наблюдается уменьшение объема годового стока для всех рек, впадающих в Каспийское море. Интенсивность снижения речного стока за 1996–2020 гг. в среднем составила 0.12 км<sup>3</sup> в год, при этом наиболее интенсивно снижался сток Волги и Куры. В условиях потепления и снижения стока продолжается снижение уровня Каспийского моря, начавшееся в конце 1990-х годов. К началу 2023 г. средняя отметка уровня достигла –28.70 м относительно нуля Балтийской системы, что примерно на 2 м ниже по сравнению с отметкой 1995 г. Приводится оценка осушения прибрежных территорий, которое к настоящему времени составило более 22 тыс. км<sup>2</sup> преимущественно в северной наиболее мелководной части моря. Обсуждаются изменения ветрового режима, наблюдаемого увеличения среднемесячной и среднегодовой скорости ветра относительно стандартного опорного периода. Установлено, что наибольшей повторяемостью отличаются восточные и западные ветры, которые вызывают штормовые сгоны и нагоны, оказывающие разрушительное воздействие на прибрежные территории. Приводится статистика сгонно-нагонных явлений для 4 морских станций за 2010–2021 гг. Амплитуда сгонно-нагонных колебаний уровня в районе Лаганы достигает максимальной величины 3.0–3.5 м, в то время как в Махачкале она составляет около 1 м. Приводится анализ сезонной изменчивости сгонно-нагонных колебаний.

**Ключевые слова:** Каспийское море, Волга, изменения климата, температура воздуха, температура воды, уровень моря, речной сток, ветер, сгоны, нагоны

**DOI:** 10.31857/S2587556623060109, **EDN:** AXJSNZ

### ВВЕДЕНИЕ

Каспийское море — самый крупный замкнутый солоноватый водоем на Земле. Основными его особенностями являются изолированность от Мирового океана и существенная меридиональная протяженность. Являющийся, по сути, огромным озером, но из-за своих размеров называемый морем, Каспий располагается в двух климатических зонах: умеренной и сухих субтропиков (южная часть моря).

Следуя терминологии (Методы ..., 2012), в этой работе климатические изменения определяются как отличие современных климатических условий в определенной области от условий предыдущих периодов. Исследования свидетельствуют о

том, что в этом смысле климатические условия Каспийского макрорегиона в настоящее время меняются (Третий ..., 2022). В первую очередь это касается увлажнения и температурного режима, а также связанного с ними ледового режима в северной части моря. Средняя годовая температура воздуха за последние 30 лет в российской части моря увеличилась на 1.0°C, скорость потепления составила в среднем 0.46°C/10 лет (Проблемы ..., 2021), при том, что в глобальном масштабе эта величина существенно ниже — 0.19°C/10 лет<sup>1</sup>. Это

<sup>1</sup> [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=20166#.ZFQq3kvP2U1](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20166#.ZFQq3kvP2U1) (дата обращения 15.03.2023); [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=20130#.ZFQq3kvP2U1](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20130#.ZFQq3kvP2U1) (дата обращения 15.03.2023).

привело к повышению средней за период температуры поверхностного слоя воды на российских островных гидрометеорологических станциях на 0.4°C (Курапов и др., 2020).

Существенное потепление в зимний сезон привело к смягчению ледовых условий в северо-западной части Каспия. Снизилось количество суровых зим. Периодичность суровых зим в XX в. составляла 15–16 лет, а в современный климатический период (1991–2020 гг.) – 27 лет (одна суровая зима 2011/2012 гг.). Среднее число дней в ледовый период со льдом в современных условиях на о. Тюлений составило 31 день, сократившись по сравнению со средней многолетней продолжительностью на 19 дней, а сроки полного очищения ото льда сдвинулись на 17 дней в сторону более ранних дат (Проблемы ..., 2021). С каждым годом уменьшается зона распространения льда и толщина ледяного покрова (Лобанов, Наурозбаева, 2021; Проблемы ..., 2021).

С повышением температуры воздуха наблюдается устойчивая тенденция к снижению количества осадков и повышению испарения с поверхности моря и прилегающих территорий. Интенсивность снижения количества осадков составила 1.9 мм в год, в то время как испарение увеличивается в среднем на 2.1 мм в год.

Наблюдающиеся климатические изменения оказывают воздействие на различные отрасли региональной экономики, связанные с морем (добыча нефти и газа, судоходство, рыболовство и добыча морепродуктов, сельскохозяйственное производство, рекреационные ресурсы), а также на здоровье и благополучие населения региона (Третий ..., 2022).

Эти изменения отражаются на гидролого-гидрохимическом режиме моря, его экосистеме и биологических ресурсах. Последствия климатических изменений для морских и прибрежных экосистем региона зарубежными исследователями уже называют катастрофическими (Lahijani et al., 2023b; Prange et al., 2020). Они привели к снижению биопродуктивности Северного Каспия, условия для развития биологических сообществ стали менее благоприятными (Курапов и др., 2020). Наблюдаются вспышки цветения водорослей в прибрежной зоне и на мелководье в летний период, эвтрофикация, гипоксия (Катунин, 2014). Смягчение ледового режима, учащение зим без устойчивого ледяного покрова представляют существенную угрозу популяции единственного каспийского млекопитающего – тюленя, поскольку практически приводят к исчезновению мест размножения для них (Prange et al., 2020). Опустынивание, усыхание прибрежных территорий, заливов, водно-болотных угодий, речных дельт, распространение пожаров на осушенных территориях угрожают жизни и здоровью людей и экономической деятельности на при-

брежных территориях (Lahijani et al., 2023a; Lattuada et al., 2019).

В связи с этим представляется актуальным изучение основных гидрометеорологических процессов, происходящих в Каспийском макрорегионе, и особенностей их современных изменений под действием меняющегося климата, а также влияния климатических факторов на состояние окружающей среды и экосистему Каспийского моря для обеспечения устойчивого развития региона и разработки мер по адаптации к изменениям климата и смягчению их неблагоприятных последствий.

Основная цель данной работы – обобщение многолетних наблюдений за гидрометеорологическими параметрами в Каспийском регионе для оценки их изменчивости в условиях меняющегося климата.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались данные наблюдений за ветром, уровнем моря, стоком Волги на государственной наблюдательной сети Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) (8 морских и 23 устьевых станций и постов), а также данные гидрометеорологических служб прикаспийских государств, получаемые по 23 морским станциям в рамках международного обмена по линии Координационного комитета по гидрометеорологии Каспийского моря (КАСПКОМ) (рис. 1).

В соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации (ВМО)<sup>2</sup>, период осреднения для получения климатических норм должен составлять 30 лет. На 16-й сессии Комиссии по климатологии ВМО было принято решение о сохранении периода 1961–1990 гг. в качестве стабильного базового периода ВМО для долгосрочной оценки изменчивости и изменения климата и для этих целей нормы пересчитывать, как и прежде, через 30 лет. Для целей мониторинга климата и оперативной оценки аномальности текущей погоды 30-летние климатологические стандартные нормы ВМО должны обновляться каждые десять лет. Во исполнение этого решения во ВНИИГМИ-МЦД рассчитаны нормы основных климатических параметров (температуры воздуха, осадков, упругости водяного пара, атмосферного давления на уровне моря) на территории России за три 30-летних периода с шагом 10 лет: 1961–1990, 1971–2000 и 1981–2010 гг. Данные наблюдений за гидрометеорологическими параметрами, получаемые в рамках КАСПКОМ, позволяют рассчитать нормы для периода последнего тридцатилетия с 1991 по 2020 г.

<sup>2</sup>[https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=20166#.ZF0q3kvP2U1](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20166#.ZF0q3kvP2U1) (дата обращения 16.03.2023).



Рис. 1. Наблюдательная сеть Росгидромета и станции КАСПКОМ.

Данными для исследования послужили среднемесячные величины температуры воздуха и температуры поверхностного слоя воды на гидрометеорологических постах, расположенных на побережье Каспийского моря на территории всех прикаспийских стран (см. рис. 1). Для расчетов выбраны станции с максимальной длиной рядов наблюдений. Всего для северной части моря обработано 2160 значений температуры воздуха (три станции – о-ва Тюлений, Пешной, Кулалы), для центральной части – 2863 (четыре станции – Махачкала, Дербент, Актау, Форт-Шевченко), для южной – 720 (одна станция – Энзели). Массив данных по температуре воды для Северного Каспия составляет 1960 наблюдений (три станции – о-ва Тюлений, Пешной, Кулалы), для Среднего – 2303 (четыре станции – Махачкала, Дербент, Актау, Форт-

Шевченко), для Южного – 1841 (три станции – Баку, Огурчинский, Сумгаит). Для каждого 30-летнего периода рассчитывались среднее многолетнее и среднеквадратическое отклонение. Значения аномалий рассчитывались как разница между климатической нормой (1961–1990 гг.) и средним значением для современного периода (1991–2020 гг.).

Для исследования многолетней изменчивости суммарного речного стока в Каспийское море также использовались данные среднемесячных величин стока рр. Волги ( $N = 694$ ), Терека ( $N = 651$ ), Сулака ( $N = 442$ ), Урала ( $N = 696$ ), Куры ( $N = 691$ ), Сефидруда ( $N = 643$ ), Хараза ( $N = 692$ ), Чалуса ( $N = 685$ ) и Полруда ( $N = 690$ ) за период 1991–2020 гг., расчеты проводились по отдельным странам.

Для оценки изменений уровня моря использовались среднегодовые величины уровня на российских станциях г. Махачкалы и о. Искусственного. Отметки среднего положения уровня Каспийского моря рассчитывались по данным семи постов с наиболее длинными рядами наблюдений: Баку, Нефт Дашлары (Нефтяные Камни), Махачкала, Форт-Шевченко, Гувлымак (Куули-Маяк), Туркменбаши (Красноводск), Дузлыбогаз (Кара-Богаз-Гол).

Исследование сгонно-нагонных явлений проводилось по российским прибрежным (Лагань, Махачкала) и островным (о-ва Искусственный, Тюлений) морским гидрометеорологическим станциям. Использовались средние суточные, месячные данные наблюдений за уровнем моря, а также регулярные наблюдения за ветром, которые проводились на станциях о. Тюлений, Махачкала, Астрахань. Рассматривались лишь такие сгоны и нагоны, которые превышали среднемесячный уровень моря на 30 см и более. Для выделения сгонов и нагонов из среднесуточных данных за определенный месяц вычиталось среднее месячное значение уровня моря. Общее число обработанных доступных данных за период 2010–2021 гг. (12 лет) составило 17520.

Анализ возможных изменений береговой линии северной части Каспийского моря выполнен в среде QGIS 2.16.1. В качестве основы была использована глобальная модель рельефа океана и суши “The GEBCO\_2022 Grid”. Эта модель рельефа предоставляет данные о высоте в метрах на сетке с интервалом 15 угловых секунд, состоящей из 43200 строк  $\times$  86400 столбцов, что дает 3732480000 точек данных. Значения данных зарегистрированы по центру пикселя, т.е. относятся к высоте в метрах в центре ячеек сетки. Полученные растровые данные о высоте были обрезаны по границам исследуемого района и на их основе построен векторный слой с изолиниями с шагом в 1 м. Также были добавлены имеющиеся фактические данные о границе береговой линии при уровне моря –28 м (БС), в формате векторного слоя. На основе этих данных были выделены зоны осушения, как районы между изолиниями –28, –29, –30 и –31 м. Далее по изолиниям был создан векторный слой с изобатами (2, 5, 10, 20 и 50 м) при уровне моря –31 м.

Статистический анализ проведен с помощью программ Microsoft Excel и Statistica 6.0. Значимость статистических различий между оценками исследуемых параметров оценивалась по критериям Стьюдента–Фишера при уровне  $\alpha = 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Изменение температуры воздуха и поверхностного слоя морской воды*

Среднегодовая температура приземного слоя воздуха в регионе Каспийского моря в последний 30-летний период увеличилась на  $1.0^{\circ}\text{C}$  в сравнении с базовым климатическим периодом. Наиболее существенное увеличение температуры воздуха пришлось на зимние месяцы. Максимальные значения температуры, наблюдаемые в современный период, также увеличились относительно базового периода. Наиболее существенное увеличение максимальных значений пришлось на осень. Значения минимальных температур воздуха в современный период снизились. Наиболее существенное снижение значений минимальных температур пришлось на осень. Для весны было отмечено увеличение значений минимальных температур. В целом это говорит о расширении диапазона температур воздуха, наблюдаемых в регионе Каспийского моря.

Наиболее существенное повышение среднегодовой температуры воздуха относительно базового климатического периода наблюдалось в районе Среднего Каспия (табл. 1), в основном за счет роста температуры в зимние месяцы. В районе Среднего и Южного Каспия наибольшее увеличение температуры воздуха приходилось на летние месяцы. Все различия статистически значимы при уровне  $\alpha = 0.05$ .

Меридиональный градиент разницы между среднегодовой температурой в диапазоне широт менее  $38^{\circ}$  и более  $46^{\circ}$  с.ш. в современный период составляет  $7.4^{\circ}\text{C}$ . Разница температур между северной частью Каспийского моря и южной с 1960-х по начало 2000-х годов постоянно снижалась (рис. 2). Период с середины 1980-х по начало 2000-х годов можно охарактеризовать как период с наименьшим значением меридионального градиента. С начала 2000-х годов по настоящее время значение меридионального градиента резко увеличилось и превысило значения начального периода. Неоднородность временного хода меридионального градиента была обусловлена более ранним началом повышения температуры воздуха в северной части региона Каспийского моря. Температура воздуха на несколько лет раньше начала увеличиваться в северной части региона (см. рис. 2). За счет большей интенсивности увеличения температуры воздуха в южной части региона в современный период значение меридионального градиента чуть превысило его значения, наблюдавшиеся в начале 1960-х годов.

Средняя за год температура поверхностного слоя воды Каспийского моря относительно базового периода увеличилась на  $0.3^{\circ}\text{C}$ . Наиболее существенное увеличение средних значений отме-

Таблица 1. Температура приземного слоя воздуха в прибрежной зоне Каспийского моря, °С

| Период                                                    | Зима       | Весна      | Лето       | Осень      | Год         |
|-----------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Северный Каспий (о-ва Кулалы, Пешной, Тюлений)            |            |            |            |            |             |
| 1961–1990                                                 | −3.5 ± 4.4 | 10.0 ± 7.4 | 24.2 ± 1.7 | 11.0 ± 6.3 | 10.4 ± 11.2 |
| 1971–2000                                                 | −3.2 ± 4.2 | 9.9 ± 7.2  | 24.4 ± 1.7 | 11.0 ± 6.5 | 10.5 ± 11.1 |
| 1981–2010                                                 | −2.5 ± 3.9 | 10.0 ± 7.3 | 24.7 ± 1.8 | 11.7 ± 6.5 | 11.0 ± 10.9 |
| 1991–2020                                                 | −2.3 ± 3.9 | 10.8 ± 6.7 | 25.1 ± 1.8 | 11.9 ± 6.7 | 11.4 ± 11.0 |
| Аномалия                                                  | 1.2        | 0.8        | 0.9        | 0.9        | 1.0         |
| Средний Каспий (Актау, Дербент, Махачкала, Форт-Шевченко) |            |            |            |            |             |
| 1961–1990                                                 | 0.8 ± 3.2  | 10.6 ± 5.6 | 23.5 ± 1.9 | 13.3 ± 5.3 | 12.1 ± 9.1  |
| 1971–2000                                                 | 0.9 ± 2.9  | 10.7 ± 5.5 | 23.8 ± 1.9 | 13.2 ± 5.6 | 12.2 ± 9.2  |
| 1981–2010                                                 | 1.3 ± 2.8  | 10.9 ± 5.2 | 24.2 ± 2.0 | 13.7 ± 5.6 | 12.6 ± 9.2  |
| 1991–2020                                                 | 1.6 ± 2.8  | 11.4 ± 5.2 | 24.8 ± 2.1 | 14.1 ± 5.8 | 13.0 ± 9.3  |
| Аномалия                                                  | 0.8        | 0.8        | 1.3        | 0.8        | 0.9         |
| Южный Каспий (Энзели)                                     |            |            |            |            |             |
| 1961–1990                                                 | 7.9 ± 2.5  | 13.8 ± 4.4 | 25.0 ± 1.4 | 18.0 ± 3.8 | 16.2 ± 7.0  |
| 1971–2000                                                 | 7.7 ± 2.3  | 13.7 ± 4.4 | 25.1 ± 1.5 | 18.1 ± 4.0 | 16.1 ± 7.1  |
| 1981–2010                                                 | 8.2 ± 2.1  | 13.8 ± 4.1 | 25.2 ± 1.6 | 18.4 ± 3.9 | 16.4 ± 7.0  |
| 1991–2020                                                 | 8.5 ± 2.0  | 14.3 ± 4.2 | 25.7 ± 1.7 | 18.6 ± 4.1 | 16.8 ± 7.0  |
| Аномалия                                                  | 0.6        | 0.5        | 0.7        | 0.5        | 0.6         |

чается в осенние месяцы для Среднего и Южного Каспия, в зимние – для Северного. Для всех станций Каспийского моря в последний тридцатилет-

ний период характерны положительные аномалии среднегодовой температуры воды поверхностного слоя (табл. 2), различия между

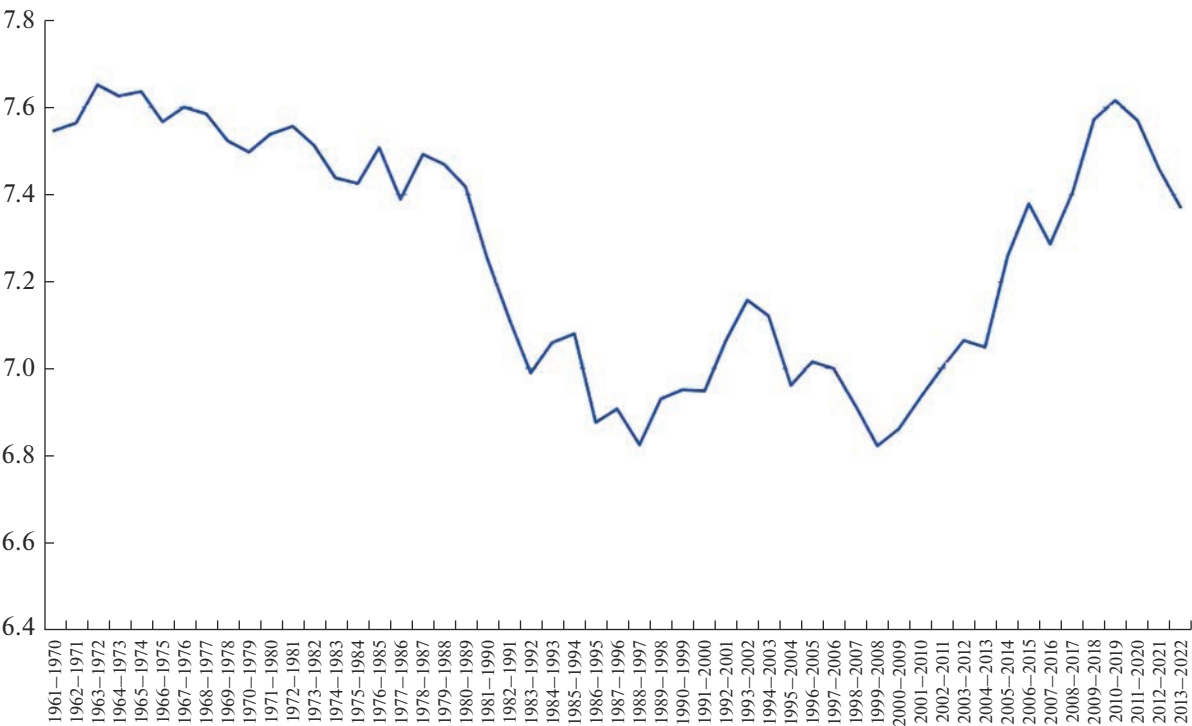


Рис. 2. Значение меридионального градиента температуры воздуха в регионе Каспийского моря.

**Таблица 2.** Температура поверхностного слоя воды в прибрежной зоне Каспийского моря, °C

| Период                                                    | Зима          | Весна          | Лето           | Осень          | Год            |
|-----------------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Северный Каспий (о-ва Кулалы, Пешной, Тюлений)            |               |                |                |                |                |
| 1961–1990                                                 | $0.8 \pm 1.2$ | $11.2 \pm 6.7$ | $24.5 \pm 1.5$ | $12.0 \pm 5.9$ | $12.2 \pm 9.5$ |
| 1971–2000                                                 | $0.8 \pm 1.1$ | $10.8 \pm 6.6$ | $24.5 \pm 1.5$ | $12.0 \pm 6.0$ | $12.1 \pm 9.6$ |
| 1981–2010                                                 | $1.1 \pm 1.3$ | $10.7 \pm 6.3$ | $24.5 \pm 1.8$ | $12.4 \pm 5.9$ | $12.2 \pm 9.4$ |
| 1991–2020                                                 | $1.4 \pm 1.3$ | $11.1 \pm 6.2$ | $24.4 \pm 2.3$ | $12.3 \pm 5.9$ | $12.3 \pm 9.3$ |
| Аномалия                                                  | <b>0.6</b>    | <b>0.1</b>     | <b>0.1</b>     | <b>0.3</b>     | <b>0.1</b>     |
| Средний Каспий (Актау, Дербент, Махачкала, Форт-Шевченко) |               |                |                |                |                |
| 1961–1990                                                 | $2.8 \pm 2.3$ | $9.7 \pm 5.2$  | $21.8 \pm 2.4$ | $14.3 \pm 4.9$ | $12.1 \pm 8.0$ |
| 1971–2000                                                 | $3.0 \pm 2.1$ | $9.8 \pm 5.0$  | $21.8 \pm 2.9$ | $14.5 \pm 4.9$ | $12.3 \pm 7.9$ |
| 1981–2010                                                 | $3.3 \pm 2.2$ | $9.8 \pm 4.7$  | $21.7 \pm 3.1$ | $15.0 \pm 4.7$ | $12.5 \pm 7.8$ |
| 1991–2020                                                 | $3.4 \pm 2.2$ | $10.1 \pm 4.6$ | $22.0 \pm 3.2$ | $15.1 \pm 4.8$ | $12.7 \pm 7.8$ |
| Аномалия                                                  | <b>0.6</b>    | <b>0.4</b>     | <b>0.2</b>     | <b>0.8</b>     | <b>0.6</b>     |
| Южный Каспий (Баку, Огурчинский, Сумгаит)                 |               |                |                |                |                |
| 1961–1990                                                 | $6.4 \pm 2.0$ | $12.7 \pm 4.6$ | $24.7 \pm 2.0$ | $17.5 \pm 4.5$ | $15.3 \pm 7.6$ |
| 1971–2000                                                 | $6.3 \pm 1.9$ | $12.6 \pm 4.5$ | $24.6 \pm 2.1$ | $17.4 \pm 4.6$ | $15.3 \pm 7.6$ |
| 1981–2010                                                 | $6.4 \pm 1.9$ | $12.5 \pm 4.5$ | $24.7 \pm 2.5$ | $17.8 \pm 4.6$ | $15.3 \pm 7.6$ |
| 1991–2020                                                 | $6.5 \pm 1.9$ | $13.0 \pm 4.6$ | $25.1 \pm 2.7$ | $17.9 \pm 4.8$ | $15.6 \pm 7.8$ |
| Аномалия                                                  | <b>0.1</b>    | <b>0.3</b>     | <b>0.4</b>     | <b>0.4</b>     | <b>0.3</b>     |

средними в стандартный и современный климатический периоды статистически значимы при уровне  $\alpha = 0.05$ .

Наиболее существенное повышение средней температуры воды произошло в Среднем Каспии (рис. 3), составив  $0.6^\circ\text{C}$ . Наиболее интенсивно выросла температура воды осенью, менее всего — летом. В Южном Каспии наибольшее повышение температуры в современный период отмечается в летние и осенние месяцы.

Сопоставление значений аномалии температуры воздуха и температуры поверхностного слоя воды (см. табл. 1 и 2) показало определенную связь между ними только в северной части моря, что, очевидно, связано с ее мелководностью и, как следствие, способностью к быстрому отклику вод на нагрев прилегающих слоев атмосферы.

#### *Изменения речного стока и уровня Каспийского моря*

Каспийское море является принимающим водоемом Волги, связь с которой прослеживается с неогена (Рычагов и др., 2010). За это время устье Волги многократно перемещалось относительно современного положения то к югу, то к северу на сотни и тысячи километров (Обедиев, 1977; Сиднев, 1985). На развитие устьевой области Волги определяющее влияние оказывали колебания уровня Каспийского моря в различные геологические эпохи (Леонтьев, 1977; Рычагов и др.,

2010). Взаимодействие реки и приемного морского бассейна сложное, постоянно трансформирующееся как рельеф взморья, так и перераспределение речной воды по дельтовым водотокам.

Приходную статью водного баланса Каспийского моря составляют атмосферные осадки, поверхностный и подземный сток, расходную — испарение и сток в залив Кара-Богаз-Гол. Непостоянство элементов водного баланса приводит к межгодовым колебаниям уровня моря. В свою очередь, изменчивость элементов водного баланса в наибольшей степени определяется климатическими факторами (Водный ..., 2016).

В настоящее время суммарный речной сток в море составляет около  $275 \text{ км}^3$ . По всем рекам, впадающим в Каспийское море, в 1996–2020 гг. относительно периода 1961–1990 гг. наблюдается уменьшение объема стока (табл. 3). Интенсивность снижения речного стока за период 1996–2020 гг. в среднем составила  $0.12 \text{ км}^3$  в год, при этом наиболее интенсивное снижение стока было зафиксировано для Волги и Куры. В то же время следует отметить, что явно выраженного линейного тренда на исследуемых временных рядах не проявляется, в данном временном интервале встречаются как маловодные, так и многоводные годы.

Как правило, наибольшее значение речного стока приходится на начало весны — период половодья (см. табл. 3). Для северной части моря (Россия, Казахстан) характерны минимальные

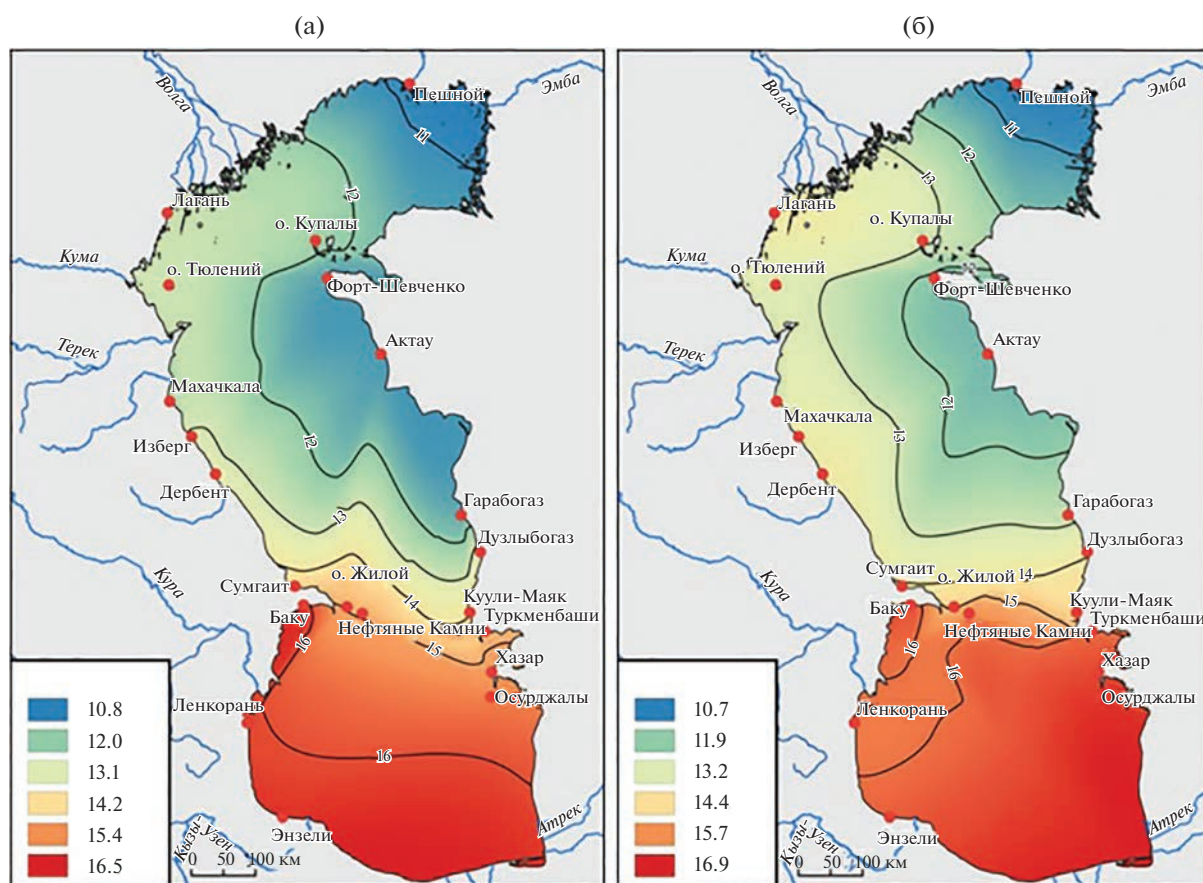


Рис. 3. Сравнение распределения средней температуры воды за: 1961–1990 гг. (а), и 1991–2020 гг. (б).

значения стока в зимний период, для южной (Азербайджан, Иран) — летом и в начале осени.

На фоне снижения количества осадков, повышения испарения и общего потепления наблюдается снижение водного стока рек Каспийского бассейна, в первую очередь Волги, на долю которой приходится более 80% общего речного стока (Водный ..., 2016). Изменения речного стока, в частности особенно важного для экосистем и водных биоресурсов весеннего стока, происходят на всей территории Волжского бассейна, при этом в самой южной части бассейна объем половодного стока уменьшился почти на 60% (Георгиевский и др., 2018). По сравнению с предшествующим периодом уменьшилось количество многоводных лет, т.е. маловодье на Волге теперь наблюдается чаще, хотя и не так часто, как это было в период 1961–1977 гг. (рис. 4).

В условиях нарастающего маловодья наблюдается тенденция к снижению уровня Каспийского моря, начавшаяся в конце 1990-х годов. На рис. 5 показана синхронность изменений уровня моря и разностно-интегральной кривой (РИК) стока Волги. Расхождения в ходе кривых уровня и РИК, начиная с середины 1990-х годов, обусловлены,

вероятно, демпфирующим влиянием оттока воды в залив Кара-Богаз-Гол после разрушения дамбы (Водный ..., 2016), тем не менее общие тенденции сходны. Увеличившееся испарение, связанное с повышением температуры воздуха, на фоне маловодья приводит к более высокой скорости снижения уровня, что согласуется с выводами А.В. Фролова (2016). К 2023 г. отметка среднего уровня достигла  $-28.7$  м относительно нуля Балтийской системы, что почти на 2 м меньше по сравнению с отметкой 1995 г. При этом темпы падения уровня в последние три года составляют около 20 см в год.

Ряд авторов (Водный ..., 2016; Chen et al., 2017; Elguindi and Giorgi, 2006; Nandini-Weiss et al., 2020; Prange et al., 2020) видят главную причину многолетних колебаний уровня Каспийского моря в изменчивости климатообразующих факторов (солнечной активности, циркуляции атмосферы и др.), влияющих на формирование элементов водного баланса и приводящих к непостоянству соотношений между отдельными его составляющими. Изменчивость климатообразующих факторов обуславливает циклические изменения объема вод моря и соответствующие им циклические колебания уровня различной продолжитель-

**Таблица 3.** Многолетние изменения суммарного речного стока в Каспийское море, км<sup>3</sup>

| Период                                 | Месяц |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Год    |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                                        | I     | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI    | XII   |        |
| Россия (Волга, Терек, Сулак)           |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| 1961–1990                              | 15.44 | 14.96 | 17.95 | 19.00 | 46.21 | 32.05 | 18.02 | 15.91 | 14.38 | 15.13 | 15.32 | 16.92 | 240.69 |
| 1991–2000                              | 15.79 | 15.48 | 18.85 | 24.84 | 54.67 | 37.45 | 21.54 | 19.12 | 17.02 | 16.48 | 16.10 | 16.21 | 272.91 |
| 2001–2010                              | 16.89 | 16.42 | 19.27 | 22.46 | 50.13 | 33.88 | 19.62 | 17.20 | 15.36 | 14.90 | 14.31 | 16.77 | 256.12 |
| 2011–2020                              | 16.06 | 15.12 | 17.64 | 21.11 | 48.59 | 28.65 | 19.97 | 16.44 | 14.44 | 14.42 | 14.43 | 17.89 | 244.12 |
| Δ*                                     | 0.62  | 0.15  | −0.31 | 2.11  | 2.38  | −3.40 | 1.95  | 0.53  | 0.06  | −0.71 | −0.89 | 0.98  | 3.44   |
| Казахстан (Урал)                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| 1961–1990                              | 0.20  | 0.18  | 0.24  | 1.18  | 2.44  | 1.46  | 0.60  | 0.37  | 0.29  | 0.30  | 0.30  | 0.23  | 7.77   |
| 1991–2000                              | 0.29  | 0.26  | 0.34  | 1.11  | 2.54  | 1.83  | 0.81  | 0.55  | 0.41  | 0.39  | 0.36  | 0.28  | 9.13   |
| 2001–2010                              | 0.25  | 0.23  | 0.31  | 1.03  | 1.81  | 1.51  | 0.67  | 0.40  | 0.29  | 0.27  | 0.27  | 0.23  | 7.27   |
| 2011–2020                              | 0.23  | 0.23  | 0.26  | 1.05  | 1.82  | 1.04  | 0.54  | 0.37  | 0.31  | 0.33  | 0.32  | 0.27  | 6.75   |
| Δ*                                     | 0.03  | 0.05  | 0.02  | −0.13 | −0.62 | −0.42 | −0.06 | 0.00  | 0.01  | 0.03  | 0.02  | 0.05  | −1.02  |
| Иран (Севфидруд, Хараз, Чалус, Полруд) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| 1961–1990                              | 0.33  | 0.32  | 0.64  | 0.85  | 0.89  | 0.39  | 0.25  | 0.31  | 0.30  | 0.35  | 0.35  | 0.37  | 4.98   |
| 1991–2000                              | 0.43  | 0.34  | 0.56  | 0.90  | 0.83  | 0.40  | 0.25  | 0.25  | 0.35  | 0.38  | 0.54  | 0.50  | 5.74   |
| 2001–2010                              | 0.19  | 0.24  | 0.35  | 0.62  | 0.56  | 0.28  | 0.24  | 0.19  | 0.11  | 0.17  | 0.25  | 0.25  | 3.47   |
| 2011–2020                              | 0.14  | 0.21  | 0.31  | 0.43  | 0.35  | 0.22  | 0.18  | 0.12  | 0.11  | 0.23  | 0.28  | 0.19  | 2.77   |
| Δ*                                     | −0.19 | −0.11 | −0.33 | −0.42 | −0.54 | −0.17 | −0.07 | −0.19 | −0.19 | −0.13 | −0.07 | −0.18 | −2.21  |
| Азербайджан (Кура)                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| 1961–1990                              | 1.38  | 1.29  | 1.42  | 1.56  | 1.89  | 1.46  | 0.90  | 0.79  | 0.81  | 0.90  | 0.98  | 1.26  | 14.66  |
| 1991–2000                              | 1.26  | 1.19  | 1.47  | 1.48  | 1.36  | 1.21  | 0.88  | 0.77  | 0.77  | 0.91  | 1.06  | 1.25  | 13.65  |
| 2001–2010                              | 1.41  | 1.17  | 1.20  | 1.43  | 1.99  | 1.33  | 0.85  | 0.75  | 0.74  | 0.88  | 1.07  | 1.17  | 14.11  |
| 2011–2020                              | 0.84  | 0.77  | 0.81  | 0.69  | 0.74  | 0.61  | 0.45  | 0.44  | 0.50  | 0.57  | 0.66  | 0.80  | 7.91   |
| Δ*                                     | −0.53 | −0.52 | −0.60 | −0.87 | −1.15 | −0.86 | −0.45 | −0.35 | −0.31 | −0.33 | −0.32 | −0.45 | −6.75  |

Примечание.  $\Delta^*$  – разница между значениями за 1961–1990 гг. и значениями за 2011–2020 гг.

ности: от двух–трехлетних до квазивековых. Эти колебания носят нерегулярный характер и трудно предсказуемы (Фролов, 2016).

Даже небольшие изменения уровня моря приводят к значительным затоплениям или осушениям прибрежных территорий. Начавшееся после 1995 г. и продолжающееся по настоящее время снижение уровня уже к 2021 г. привело к осушению территории в северной части Каспийского моря суммарной площадью около 20573 км<sup>2</sup> [оценка сделана на основе расчета водного баланса по формулам, приведенным в монографии (Водный ..., 2016)]. Изменилась конфигурация береговой линии. В результате отступления моря были осушены значительные пространства дна прибрежного участка моря – более чем 50 км шириной. Площадь поверхности северной части Каспийского моря при этом изменялась от 106983 км<sup>2</sup> в 1995 г. до 86450 км<sup>2</sup> в 2021 г. На картосхеме (рис. 6), построенной для разных отметок среднего уровня Каспийского моря от –28.0 до –31.0 м БС, показано,

что наибольшим изменениям при колебаниях уровня подвергается береговая линия в северо-восточной, наиболее мелководной части моря. По мере дальнейшего снижения уровня, будут подниматься из воды затопленные ныне банки, северная часть будет мелеть и уменьшаться в размерах. Некоторые исследователи считают, что падение уровня продолжится до конца текущего столетия и достигнет 9 м (Elguindi and Giorgi, 2006) или 18 м (Prange et al., 2020), что приведет к практически полному осушению северной части моря. Другие полагают (Борисов и др., 2019), что падение уровня не будет столь катастрофичным, достигнет примерно отметки –31.0 м БС к 2045 г., после чего уровень начнет повышаться. В палео-времени такие смены трансгрессии и регрессии моря отмечаются неоднократно (Свиточ, 2015, 2016; Leroy et al., 2022), и вероятнее всего продолжатся и в будущем.

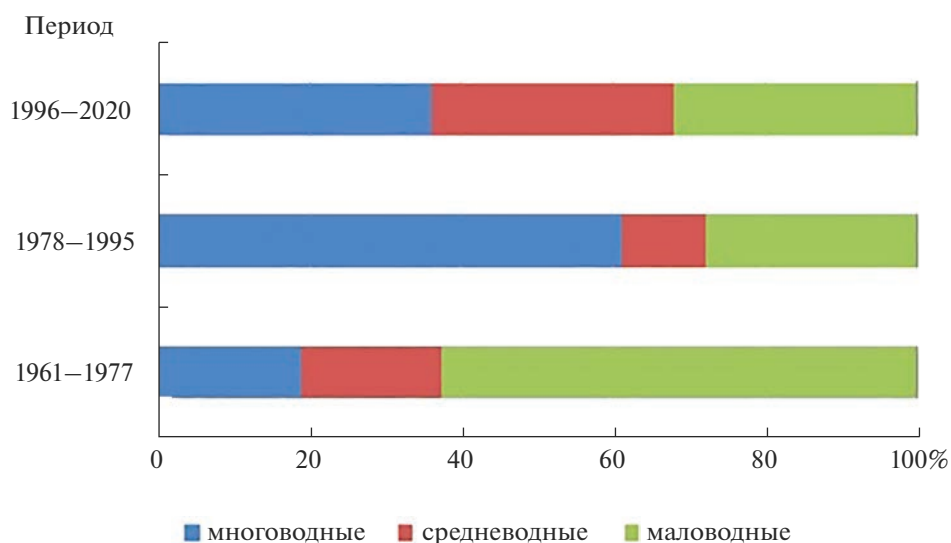


Рис. 4. Изменения в структуре водности р. Волги в разные периоды с 1961 по 2020 г.

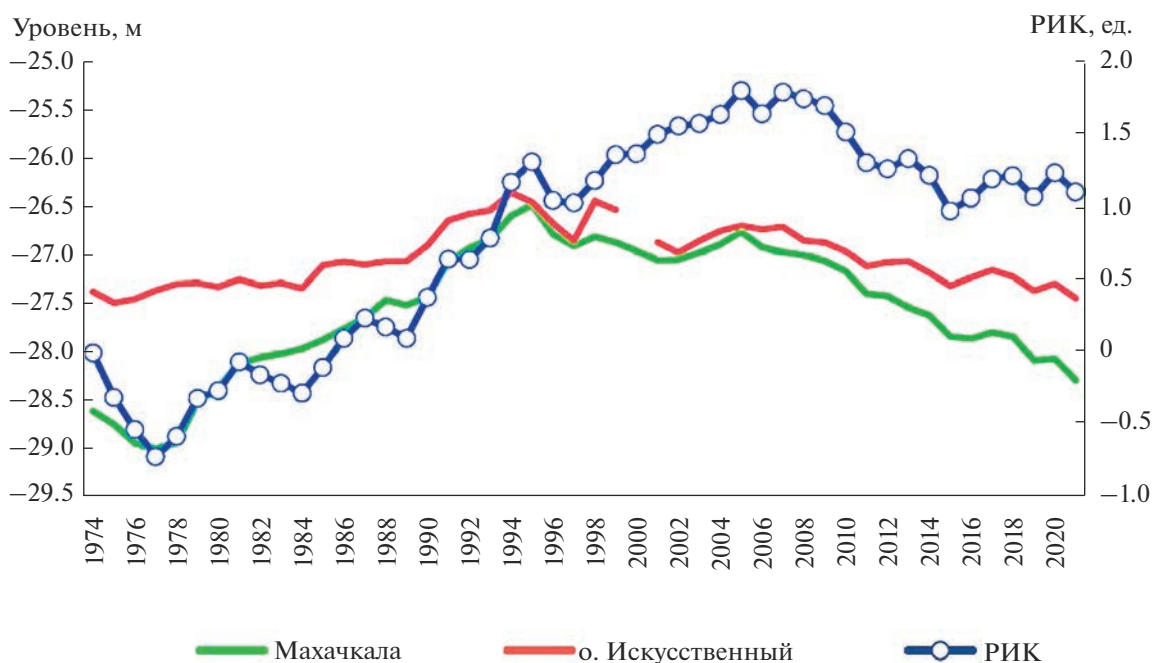


Рис. 5. Уровень моря (на станциях Махачкала, о. Искусственный) и разностно-интегральная кривая (РИК) стока Волги (с. Верхнее Лебяжье) в 1974–2021 гг.

#### Ветер и сгонно-нагонные явления

В целом для Южного и Северо-Кавказского федеральных округов характерны такие опасные явления, как сильный ветер, осадки, экстремальные температуры, град (Глобальное ..., 2021). Прикаспийские регионы России (Астраханская область, Республики Дагестан и Калмыкия) являются относительно благополучными по гидрометеорологическим опасным явлениям (Гидрометеорологические ..., 2001).

Для Прикаспия характерны сильные ветры, с максимальными скоростями в диапазоне 25–34 м/с, повторяемость скорости ветра более 25 м/с составляет 5–10 случаев за 10 лет. Сильные ливни (с выпадением 50–100 мм в сутки) отмечаются только в южной части Дагестана, повторяемость сильных дождей (от 50 мм в сутки) для территории Калмыкии и Дагестана составляет 5–10 случаев за 10 лет. Общая частота опасных явлений составила 15 случаев за 10 лет в Дагестане.

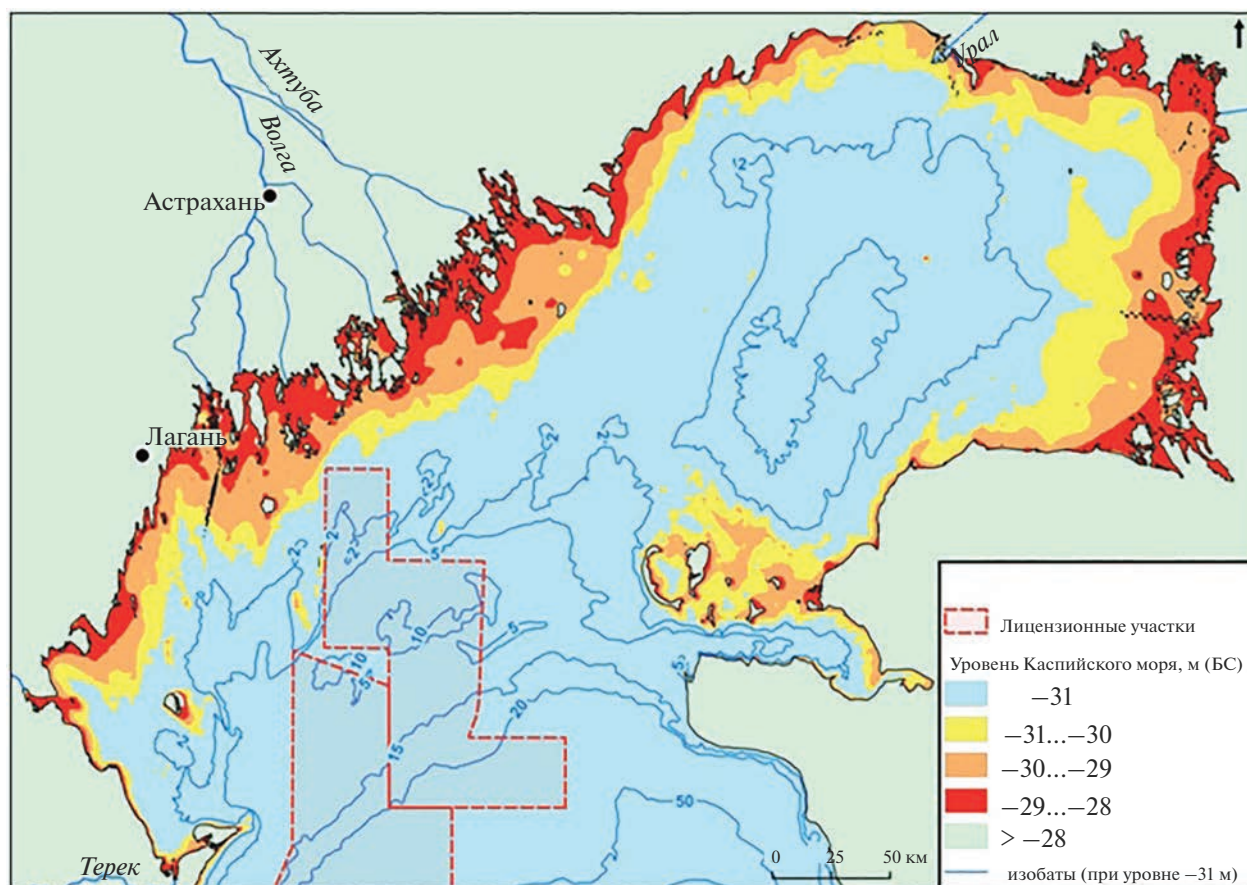


Рис. 6. Возможные изменения береговой линии северной части Каспийского моря в диапазоне уровня от  $-28.0$  до  $-31.0$  м (БС).

не, в то время как в Астраханской области и Калмыкии этот показатель минимален по сравнению со средним по России (Глобальное ..., 2021).

В настоящее время отмечаются определенные изменения ветрового режима на открытой акватории моря, для анализа которых использовались данные на морской станции о. Тюлений.

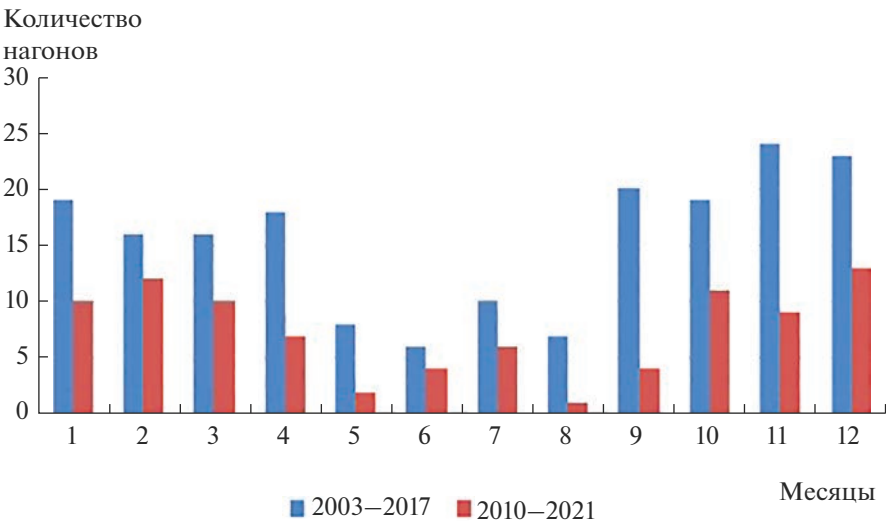
Как и в предыдущий 30-летний период (1961–1990 гг.), в северо-западной части Каспийского моря в последнее десятилетие (2010–2021 гг.) и в годовом распределении, и по сезонам преобладают ветры восточных румбов (в основном это В и ЮВ ветры), повторяемость которых составляет около 25%. Однако наблюдается увеличение среднемесячной и среднегодовой скорости ветра за последние 30 лет относительно стандартного опорного периода (1961–1990 гг.). Максимальное среднемесячное отклонение от нормы в сторону увеличения скорости ветра достигает 1.2 м/с и среднегодовое — 0.8 м/с. Статистически значимые положительные приращения отмечаются практически по всем месяцам года, за исключением января и февраля. При этом 50% повторяемостью отличаются ветры со скоростью от 6 до 13 м/с, в то

же время наблюдается снижение максимальных скоростей ветра. Так, скорость ветра 25 м/с и более часто наблюдалась в период 1999–2008 гг., а начиная с 2009 г. ветры со скоростью 25 м/с отмечались лишь в 2013 и 2015 гг.

В российской части Каспийского моря ветры юго-восточного и восточного направлений с повторяемостью в среднем за исследуемый период соответственно 25.0 и 22.6%, вызывают нагоны, а западные и северо-западные ветры с повторяемостью 10.4 и 15.4% — сгоны. Наибольший материальный и экологический ущерб в прибрежной зоне наносят катастрофические штормовые нагоны, которые могут распространяться вглубь территории на десятки км в течение нескольких часов (Нестеров и др., 2018).

Сезонное распределение сгонно-нагонных колебаний исследовалось за период 2010–2021 гг. В этот период по сравнению с периодом 2003–2017 гг. среднее количество нагонов снизилось (на примере станции о. Тюлений) (рис. 7).

Всего в 2010–2021 гг. наблюдалось 400 случаев сгона и 442 нагона (табл. 4). За это время в Лагани наблюдались 23 сильных (более 1 м) нагона и



**Рис. 7.** Среднее количество нагонов в Северном Каспии (о. Тюлений) в 2010–2021 гг. по сравнению с 2003–2017 гг. *Источник данных за 2003–2017 гг.: (Нестеров и др., 2018).*

5 сгонов, в то время как на о-вах Тюлений и Искусственный – по 1 нагону. Средняя высота наибольших за год нагонов по данным Лагани за 2010–2021 гг. составила 125 см, максимальная (229 см) отмечалась 30 марта 2015 г.

В соответствии с характером ветров максимальное число сгонно-нагонных колебаний уровня, по данным станций о. Тюлений и Махачкала, приходится на зимний период (ноябрь–февраль), а минимальное – на летний (с июня по август), что согласуется с данными (Нестеров и др., 2018) (рис. 8). На о. Тюлений преобладают нагоны, их максимум приходится на октябрь–март, максимальная продолжительность достигала шести дней (23–28.02.2011 г. и 16–21.11.2020 г.). Сгоны здесь чаще всего наблюдаются с октября по февраль, продолжительность сгонов в среднем составила 1–3 дня.

На о. Искусственный максимум сгонов и нагонов приходится на весну. Преобладают нагоны, максимум наблюдается в марте, апреле. Максимальная продолжительность составила четыре дня (20–23.11.2013 г.).

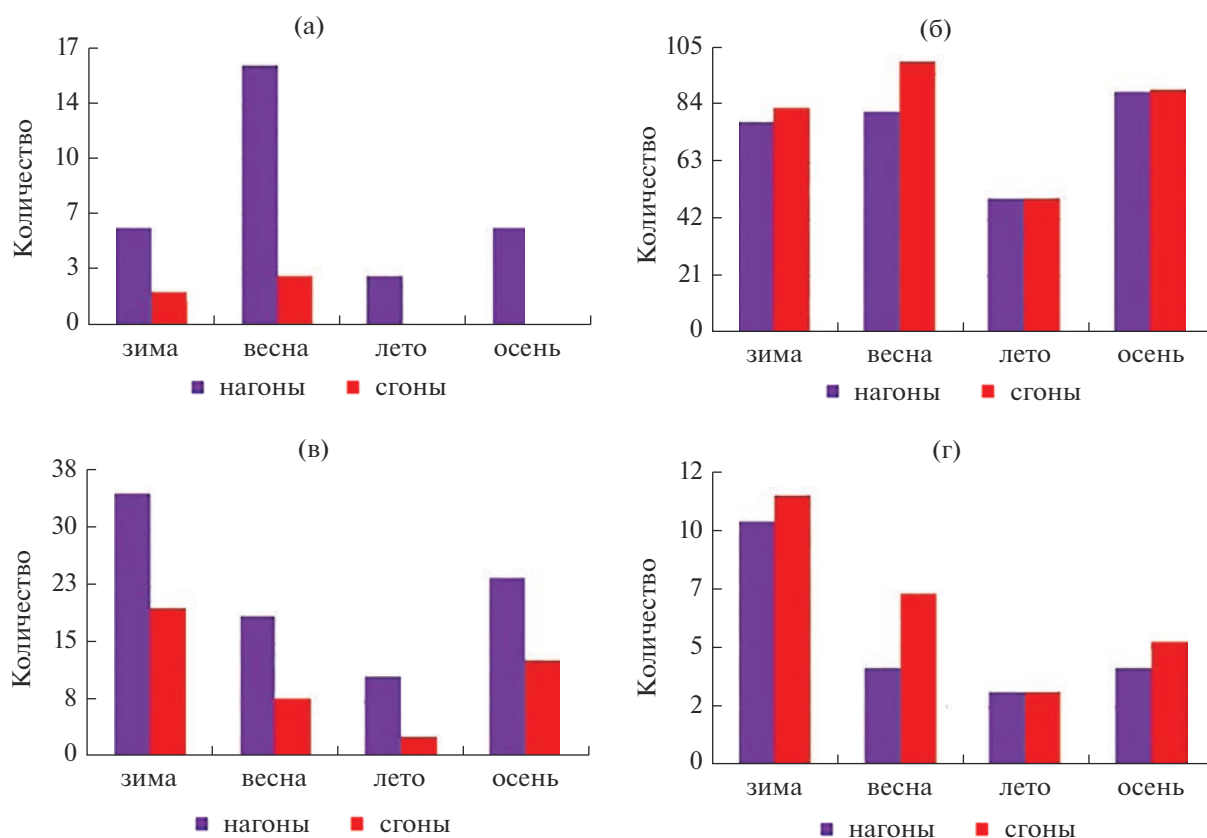
В Лагани максимум сгонов отмечается весной, а максимум нагонов – осенью, общее количество сгонно-нагонных явлений летом и осенью одинаковое. Преобладают сгоны, максимум сгонов наблюдается в марте, апреле, октябре и в декабре, продолжительность сгонов в среднем составила 1–5 дней, максимальная продолжительность достигала 9 дней (06–14.11.2020 г.). Наибольшее число нагонов наблюдается в период с сентября по апрель, максимальная продолжительность достигала 7 дней (03–09.09.2018 г., 16–22.11.2020 г., 02–08.10.2021 г.).

Анализ сгонно-нагонных явлений показывает, что средняя продолжительность нагонов составляет 1–4 дня, продолжительность сгонов воды изменяется от одного дня до нескольких суток. Чаще всего наблюдаются сгонно-нагонные явления продолжительностью 1–2 дня (табл. 5).

Наибольшую повторяемость имели нагоны в интервале 30–50 см. Наибольшей величины сгон-

**Таблица 4.** Количество сгонов и нагонов, наблюдаемых на станциях в российской части Каспийского моря, 2010–2021 гг.

| Показа-<br>тель  | Месяц |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Σ   |
|------------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
|                  | 1     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |     |
| о. Искусственный |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| Нагоны           | 2     | 1  | 7  | 8  | 1  | 2  | 1  | 0  | 1  | 3  | 2  | 4  | 32  |
| Сгоны            | 0     | 2  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 5   |
| Σ                | 2     | 3  | 8  | 9  | 2  | 2  | 1  | 0  | 1  | 3  | 2  | 4  | 37  |
| Лагань           |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| Нагоны           | 29    | 22 | 31 | 29 | 22 | 21 | 13 | 16 | 29 | 27 | 34 | 27 | 300 |
| Сгоны            | 24    | 25 | 36 | 35 | 29 | 17 | 20 | 13 | 25 | 34 | 31 | 36 | 325 |
| Σ                | 53    | 47 | 67 | 64 | 51 | 38 | 33 | 29 | 54 | 61 | 65 | 63 | 625 |
| о. Тюлений       |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| Нагоны           | 10    | 12 | 10 | 7  | 2  | 4  | 6  | 1  | 4  | 11 | 9  | 13 | 89  |
| Сгоны            | 6     | 5  | 4  | 3  | 1  | 1  | 0  | 2  | 2  | 6  | 5  | 9  | 44  |
| Σ                | 16    | 17 | 14 | 10 | 3  | 5  | 6  | 3  | 6  | 17 | 14 | 22 | 133 |
| Махачкала        |       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| Нагоны           | 1     | 4  | 3  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 4  | 5  | 21  |
| Сгоны            | 4     | 4  | 2  | 3  | 2  | 2  | 1  | 0  | 1  | 1  | 3  | 3  | 26  |
| Σ                | 5     | 8  | 5  | 4  | 2  | 3  | 2  | 1  | 1  | 1  | 7  | 8  | 47  |



**Рис. 8.** Сезонная изменчивость сгонно-нагонных явлений по сезонам в среднем за 2010–2021 гг. на станциях: (а) о. Искусственный; (б) Лагань; (в) о. Тюлений; (г) Махачкала.

но-нагонные колебания уровня достигают в районе Лаганы, на нагоны в интервале 51–100 см приходилось 26.1%, на нагоны более 100 см – 4.5%; для сгонов повторяемость составила 33.5 и 1.0% соответственно. Величина нагонов существенно больше, чем сгонов. Сгоны более 100 см не наблюдались. Максимальная величина нагона составила 229 см; максимальная величина сгона составила 120 см. На остальных станциях сильные нагоны и сгоны, превышающие 50 см, наблюдались достаточно редко: доля нагонов в интервале 51–100 см для о. Тюлений составила 7.0%, для Махачкалы и о. Искусственный 0.2 и 2.0%; доля сгонов в интервале 51–100 см составила 0.5% на о. Тюлений от общего числа всех зарегистри-

рованных случаев. По сравнению с периодом высокого стояния уровня Каспийского моря, в современный период снижения уровня высота нагонов снижается, что соответствует выводам (Водный ..., 2016).

Основными синоптическими ситуациями, приводящими к значительным нагонам (более 1 м), в исследуемый период были отроги и гребни азиатского антициклона (78.5%), нагоны циклонического происхождения более редки (11.4%), нагоны, возникающие под влиянием скандинавских антициклонов, составили 6.3%, карских антициклонов – 3.8%. Влияние сильных западных, северо-западных и юго-западных ветров, вызывающих сгоны, было обусловлено воздействием греб-

**Таблица 5.** Продолжительность нагонных и сгонных явлений в северо-западной части Каспийского моря, 2010–2021 гг.

| Продолжительность | о. Искусственный |      | Лагань |      | о. Тюлений |      | Махачкала |      |
|-------------------|------------------|------|--------|------|------------|------|-----------|------|
|                   | нагон            | сгон | нагон  | сгон | нагон      | сгон | нагон     | сгон |
| 1–2 дня           | 27               | 5    | 240    | 266  | 73         | 40   | 20        | 26   |
| 3–5 дней          | 5                | 0    | 54     | 58   | 14         | 4    | 1         | 0    |
| Более 6 дней      | 0                | 0    | 6      | 1    | 2          | 0    | 0         | 0    |

ней и отрогов азорского антициклона (45%), сгоны, вызываемые каспийскими, южными и северо-западными циклонами в сумме составили 54%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты анализа данных многолетних наблюдений за отдельными гидрометеорологическими показателями состояния окружающей среды в регионе Каспийского моря, выполненного с целью оценки их изменчивости в современный период. Анализ многолетних рядов температуры приземного слоя воздуха на станциях наблюдательной сети в регионе Каспийского моря показывает повышение ее среднегодовой величины в последний 30-летний период на  $1.0^{\circ}\text{C}$  в сравнении с базовым климатическим периодом, что совпадает и с другими исследованиями (Третий ..., 2022; Торопов и др., 2018). Наиболее существенное увеличение температуры воздуха пришлось на зимние месяцы. Максимальные значения температуры, наблюдаемые в современный период, также увеличились относительно базового периода. Наиболее существенное увеличение максимальных значений пришлось на осень. Значения минимальных температур воздуха в современный период снизились. Наиболее существенное снижение значений минимальных температур пришлось на осень. Для весны было отмечено увеличение значений минимальных температур. Наиболее существенное повышение среднегодовой температуры воздуха относительно базового климатического периода наблюдалось на станциях в Среднем Каспии по сравнению с другими районами моря. В северной части моря наиболее интенсивно температура воздуха повышалась зимой, а в южной — летом. На фоне потепления росла и температура поверхностного слоя воды. Средняя годовая температура воды Каспийского моря в последние 30 лет относительно базового периода увеличилась на  $0.3^{\circ}\text{C}$ . Наиболее существенное увеличение средних значений отмечается в осенние месяцы. Наиболее существенное повышение температуры произошло в Южном Каспии. Менее всего менялась температура воды в Среднем Каспии. Наибольшее повышение температуры воды в Северном Каспии приходилось на осенние и зимние месяцы.

В настоящее время суммарный речной сток в море составляет около  $275 \text{ км}^3$ , 80% которых приходится на Волгу. По всем рекам, впадающим в Каспийское море, в период 1996–2018 относительно периода 1961–1990 гг. наблюдается уменьшение объема стока. Интенсивность снижения объемов речного стока за период 1996–2018 гг. в среднем составила  $0.12 \text{ км}^3$  в год, при этом наиболее интенсивное снижение стока было зафиксировано для Волги и Куры, причем для первой это

было обусловлено природными факторами, а для второй — антропогенным изъятием. По сравнению с предшествующим периодом отмечаются изменения в структуре водности Волги, маловодье на Волге теперь наблюдается чаще, хотя и не так часто, как это было в маловодный период 1961–1977 гг. В условиях нарастающего маловодья и повышенных температур воздуха, приводящих к повышенному испарению, тенденция к снижению уровня Каспийского моря, наблюдающаяся с конца 1990-х годов, сохраняется. Это позволяет согласиться с выводами авторов (Водный ..., 2016), что современные изменения уровня моря связаны с климатическими изменениями в его бассейне. К 2023 г. отметка среднего уровня достигла  $-28.7 \text{ м}$  относительно нуля Балтийской системы, что почти на 2 м меньше по сравнению с отметкой 1995 г. При этом темпы падения уровня в последние три года составляют около 20 см в год. Осушение прибрежных территорий, связанное с падением уровня, оценено в 22 тыс.  $\text{км}^2$ .

Проведенный анализ позволил также выявить определенные изменения ветрового режима и сгонно-нагонных явлений на акватории российской части Каспийского моря. Преобладают в годовом и сезонном распределении, как и ранее, ветры восточных румбов (в основном это восточные и юго-восточные ветры), повторяемость которых составляет около 25%. Наблюдается увеличение среднемесячной и среднегодовой скорости ветра относительно стандартного опорного периода (1961–1990 гг.). Максимальное среднемесячное отклонение от нормы в сторону увеличения скорости ветра достигает 1.2 м/с и среднегодовое — 0.8 м/с. Статистически значимые положительные приращения отмечаются практически по всем месяцам года, за исключением января и февраля. Восточные ветры в западной части моря вызывают разрушительные штормовые нагоны. Анализ сезонного распределения сгонно-нагонных колебаний за период 2010–2021 гг. показал заметное снижение количества нагонов и их амплитуды, что, вероятно, связано с более низкими отметками уровня (Нестеров и др., 2018).

В заключение отметим, что прогнозы, основанные на моделях МГЭИК, показывают, что описанные тенденции климатических изменений будут продолжаться (Третий ..., 2022) и, следовательно, в ближайшие 10–15 лет естественные изменения гидрометеорологических условий на Каспии будут происходить на фоне повышенной температуры воздуха. Некоторые работы (Chen et al., 2017; Prange et al., 2020) прогнозируют практически полное осушение северной части Каспийского моря из-за продолжающейся регрессии уровня к концу этого столетия. В этой связи гидрометеорологические, гидрографические и геоморфологические исследования на Каспии и устьевых областях впадающих в него рек будут чрезвычайно ак-

туальны для обеспечения безопасности морской и прибрежной инфраструктуры, судоходства и социально-экономического развития региона в целом.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность своим коллегам Дегтяревой Л.В. и Светашевой Д.Р. за подготовку рукописи статьи к печати.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to their colleagues L.V. Degtyareva and D.R. Svetasheva for preparing this paper for publication.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов Е.В., Ермаков В.Б., Мельников В.А.* Анализ периодической структуры климатических колебаний уровня Каспийского моря // Процессы в геосредах. 2019. № 2. С. 146–152.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / под ред. Е.С. Нестерова. М.: Триада Лтд, 2016. 374 с.
- Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г.* Пространственно-временные изменения характеристик экстремального стока рек бассейна Волги // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 8–16.
- Гидрометеорологические опасности / под ред. Г.С. Голицына, А.А. Васильева. М.: КРУК, 2001. Т. 5. 295 с.
- Глобальное изменение климата и Южный федеральный округ. На пути к адаптации. Климатический центр Росгидромета. СПб.: Научные технологии, 2021. 12 с.
- Катунин Д.Н.* Гидроэкологические основы формирования экосистемных процессов в Каспийском море и дельте реки Волги. Астрахань: КаспНИРХ, 2014. 478 с.
- Курапов А.А., Островская Е.В., Даурова Д.С., Васильева Т.В.* Влияние изменений климата на биологические сообщества Северного Каспия / отв. ред. А.Ф. Сокольский. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2020. 265 с.
- Леонтьев О.К., Маев Е.Г., Рычагов Г.И.* Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 210 с.
- Лобанов В.А., Наурузбаева Ж.К.* Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия: Монография. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с.
- Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / науч. ред. С.М. Семенов. М.: Росгидромет, 2012. 510 с.
- Нестеров Е.С., Попов С.К., Лобов А.Л.* Статистика и моделирование штормовых нагонов в Северном Каспии // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 53–59.
- Обедиентова Г.В.* Эрозионные циклы и формирование долины Волги. М.: Наука, 1977. 239 с.
- Проблемы загрязнения устьевой области Волги / отв. ред. Е.В. Островская. Астрахань: Издатель Сорокин Р.В., 2021. 328 с.
- Рычагов Г.И., Коротаев В.Н., Чернов А.В.* История формирования палеодельты Нижней Волги // Геоморфология. 2010. № 3. С. 73–81.
- Свиточ А.А.* Палеогеография Большого Каспия // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2015. № 4. С. 69–80.
- Свиточ А.А.* Регрессивные эпохи большого Каспия // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 134–148.
- Сиднев А.В.* История развития гидрографической сети плиоцена в Предуралье. М.: Наука, 1985. 224 с.
- Торопов П.А., Алешина М.А., Семенов В.А.* Тенденции изменений климата Черноморско-Каспийского региона за последние 30 лет // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2018. № 2. С. 67–77.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. Росгидромет. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.
- Фролов А.В.* Моделирование влияния оттока в залив Кара-Богаз-Гол на плотность распределения вероятности уровня Каспийского моря // Математическое моделирование и численные методы. 2016. № 3 (11). С. 79–92.
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S.* Long-term Caspian Sea level change // Geophys. Res. Lett. 2017. Vol. 44. P. 6993–7001. <https://doi.org/10.1002/2017GL073958>
- Elguindi N., Giorgi F.* Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. Article L08706. <https://doi.org/10.1029/2006GL025943>
- Lahijani H.A.K., Azizpour J., Arpe K., Abtahi B., et al.* Tracking of sea level impact on Caspian Ramsar sites and potential restoration of the Gorgan Bay on the southeast Caspian coast // Science of The Total Environ. 2023a. Vol. 857. Part 1. Article 158833.
- Lahijani H., Leroy S.A.G., Arpe K., Cretaux J.-F.* Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review // Earth-Science Reviews. 2023b. Vol. 241. Article 104428.
- Lattuada M., Albrecht C., Wilke T.* Differential impact of anthropogenic pressures on Caspian Sea ecoregions // Mar. Poll. Bull. 2019. Vol. 142. P. 274–281.
- Leroy S.A.G., Reimer P.J., Lahijani H.K., Naderi Beni A., Sauer E., Chali'e F., Arpe K., Demory F., Mertens K., Belkacem D., Kakroodi A.A., Omrani Rekavandi H., Nokandeh J., Amini A.* Caspian Sea levels over the last 2200 years, with new data from the S-E corner // Geomorphology. 2022. Vol. 403. Article 108136.
- Nandini-Weiss Sri D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M.* Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area // Int. J. of Climatology. 2020. Vol. 40. P. 2717–2731. <https://doi.org/10.1002/joc.6362>
- Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P.* The other side of sea level change // Commun Earth Environ. 2020. Vol. 1 (69). <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>

## Hydrometeorological Parameters of the Marine Environment in the Russian Sector of the Caspian Sea under Changing Climate

E. V. Ostrovskaya<sup>1</sup>\*, E. V. Gavrilova<sup>1</sup>, I. V. Gontovaya<sup>1</sup>, V. O. Tatarnikov<sup>1</sup>, and M. A. Ocheretnyi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Caspian Marine Scientific Research Center, Astrakhan, Russia

\*e-mail: eostrovskaya@mail.ru

The paper summarizes the data from long-term observations of hydrometeorological parameters in the Caspian macro-region. The average annual air temperature over the past 30 years at stations in the Russian part of the Caspian Sea has increased by 1.0°C and the temperature of the surface water layer by 0.3°C. Currently, the total river runoff into the sea is about 275 km<sup>3</sup>. The volume of annual runoff from all rivers flowing into the Caspian Sea went down in the 1996–2020 period compared to the 1961–1990 period. The intensity of the decrease in river runoff in the 1996–2020 period averaged 0.12 km<sup>3</sup> per year, while the flow of the Volga and Kura rivers decreased most intensively. In conditions of warming and decreasing river runoff, the Caspian Sea level continues to decline, which began in the late 1990s. Due to increasing water scarcity in the Volga River, the level of the Caspian Sea is going down. The trend started in the late 1990s. By the beginning of 2023, the average sea level had reached –28.70 m abs, which is about 2 m lower compared to the level in 1995. The drained coastal territories are assessed at more than 22 thous. km<sup>2</sup>, mainly in the northern shallowest part of the sea. The changes in the wind regime and the observed increase in the average monthly and yearly wind speeds are compared against those in the standard reference period (1961–1990). It has been established that the easterly and westerly winds, which cause storm surges with devastating impact on coastal territories, have the greatest repeatability. The statistics of surges observed at four marine stations are given for the 2010–2021 period. The amplitude of the wind-induced level fluctuations in the Lagan area reaches a maximum value of 3.0–3.5 m, while it is about 1 m in Makhachkala. An analysis of the seasonal variability of surges is also given.

**Keywords:** Caspian Sea, Volga River, climate change, air temperature, water temperature, sea level, river flow, wind, storm surge

### REFERENCES

- Borisov E.V., Ermakov V.B., Mel'nikov V.A. Analysis of the periodical structure of the climatic variations of the Caspian Sea level. *Prots. Geosredakh*, 2019, no. 2, pp. 146–152. (In Russ.).
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Long-term Caspian Sea level change. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, pp. 6993–7001.  
<https://doi.org/10.1002/2017GL073958>
- Elguindi N., Giorgi F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, vol. 33, article L08706.  
<https://doi.org/10.1029/2006GL025943>
- Frolov A.V. Modeling the effect of outflow into the Karabogaz-Gol Bay on the probability distribution density of the Caspian Sea level. *Matem. Modelir. Chisl. Metody*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 79–92. (In Russ.).
- Georgievskii V.Yu., Grek E.A., Grek E.N., Lobanova A.G., Molchanova T.G. Spatiotemporal Changes in Extreme Runoff Characteristics for the Volga Basin Rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 633–638.  
<https://doi.org/10.3103/S1068373918100011>
- Gidrometeorologicheskie opasnosti. T. 5* [Hydrometeorological Threats. Vol. 5]. Golitsyn G.S., Vasil'ev A.A., Eds. Moscow: KRUK Publ., 2001. 295 p.
- Global'noe izmenenie klimata i Yuzhnyi federal'nyi okrug. Na puti k adaptatsii* [Global Climate Change and South Federal District. A Way to Adaptation]. St. Petersburg: Naukoemkie tehnologii Publ., 2021. 12 p.
- Katunin D.N. *Gidroekologicheskie osnovy formirovaniya ekosistemnykh protsessov v Kaspiiskom more i del'te reki Volgi* [Hydroecology Shaping the Ecosystem Processes in the Caspian Sea and the Volga River Delta]. Astrakhan': KaspNIRH Publ., 2014. 478 p.
- Kurapov A.A., Ostrovskaya E.V., Dairova D.S., Vasil'eva T.V. *Vliyanie izmenenii klimata na biologicheskie soobshchestva Severnogo Kaspiya* [Climate Change Impact on Biological Communities of the Northern Caspian]. Sokol'skii A.F., Ed. Astrakhan': Sorokin R.V. Publ., 2020. 265 p.
- Lahijani H., Azizpour J., Arpe K., Abtahi B., Rahnema R., Ghafarian P., Ali Hamzeh M., Hamzehpour A., Mohammadpour Penchah M., Masoud Mahmoudof S. Tracking of sea level impact on Caspian Ramsar sites and potential restoration of the Gorgan Bay on the southeast Caspian coast. *Sci. Total Environ.*, 2023a, vol. 857, part 1, article 158833.
- Lahijani H., Leroy S.A.G., Arpe K., Cretaux J.-F. Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review. *Earth-Sci. Rev.*, 2023b, vol. 241, article 104428.
- Lattuada M., Albrecht C., Wilke T. Differential impact of anthropogenic pressures on Caspian Sea ecoregions. *Mar. Poll. Bull.*, 2019, vol. 142, pp. 274–281.
- Leont'ev O.K., Maev E.G., Rychagov G.I. *Geomorfologiya beregov i dna Kaspiiskogo morya* [Geomorphology of the Coast and Bottom of the Caspian Sea]. Moscow: MSU Publ., 1977. 210 p.
- Leroy S.A.G., Reimer P.J., Lahijani H.K., Naderi Beni A., Sauer E., Chali'e F., Arpe K., Demory F., Mertens K., Belkacem D., Kakroodi A.A., Omrani Rekavandi H.,

- Nokandeh J., Amini A. Caspian Sea levels over the last 2200 years, with new data from the S-E corner. *Geomorphology*, 2022, vol. 403, article 108136.
- Lobanov V.A., Naurozbaeva Zh.K. *Vliyanie izmeneniya klimata na ledovyi rezhim Severnogo Kaspiya* [Climate Change Impact on Ice Regime of the Northern Caspian]. St. Petersburg: RGGMU Publ., 2021. 140 p.
- Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods of the Climate Change Assessment for Physical and Biological Systems]. Semenov S.M., Ed. Moscow: Rosgidromet Publ., 2012. 510 p.
- Nandini-Weiss Sri D., Prange M., Arpe K., Merkel U., Schulz M. Past and future impact of the winter North Atlantic Oscillation in the Caspian Sea catchment area. *Int. J. Climatol.*, 2020, vol. 40, pp. 2717–2731. <https://doi.org/10.1002/joc.6362>
- Nesterov E.S., Popov S.K., Lobov A.L. Statistical Characteristics and Modeling of Storm Surges in the North Caspian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, pp. 664–669. <https://doi.org/10.3103/S1068373918100059>
- Obedientova G.V. *Eroziionnye tsikly i formirovanie doliny Volgi* [Erosion Cycles and Valley Shaping of the Volga River]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 239 p.
- Prange M., Wilke T., Wesselingh F.P. The other side of sea level change. *Commun. Earth Environ.*, 2020, vol. 1, article 69. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00075-6>
- Problemy zagryazneniya ust'evoi oblasti Volgi* [Pollution Problems in the Volga Mouth Area]. Ostrovskaya E.V., Ed. Astrakhan': Sorokin R.V. Publ., 2021. 328 p.
- Rychagov G.I., Korotaev V.N., Chernov A.V. Historical review of the Lower Volga paleo-delta shaping. *Geomorfologiya*, 2010, no. 3, pp. 73–81. (In Russ.).
- Sidnev A.V. *Istoriya razvitiya gidrograficheskoi seti pliotsena v Predural'e* [Historical Review of the Pliocene Hydrographic Network in Urals Foothills]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 224 p.
- Svitoch A.A. Paleogeography of the Great Caspian. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2015, no. 4, pp. 69–80. (In Russ.).
- Svitoch A.A. Regressive periods of the Great Caspian. *Water Resour.*, 2016, vol. 43, pp. 270–282. <https://doi.org/10.1134/S0097807816020160>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Semenov V.A. Trends in change of climate in the Black and Caspian Sea region for the last thirty years. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2018, no. 2, pp. 67–77. (In Russ.).
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third Assessment Report on the Climate Change and Its Effect on the Russian Federation Territory]. Kattsov V.M., Ed. St. Petersburg: Naukoemkie tehnologii Publ., 2022. 676 p.
- Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* [Water Budget and Level Variations of the Caspian Sea. Modelling and Forecast]. Nesterov E.S., Ed. Moscow: Triada Publ., 2016. 374 p.