

Элементы мезомасштабной динамики вод в восточной части Среднего Каспия: спутниковые наблюдения, натурные измерения, результаты моделирования

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, kostianoy@gmail.com, sheremet@ocean.ru

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

³ *Майкопский государственный технологический университет*
Майкоп, 385000, Россия

Проведено сопоставление некоторых элементов мезомасштабной циркуляции поверхностных вод восточной части Среднего Каспия (тёплых струйных потоков из Южного Каспия в Средний и течений в зоне прибрежного апвеллинга), выявленных анализом спутниковых изображений температуры поверхности моря (ТПМ) разных лет, с известными результатами натурных измерений и численного моделирования с использованием вихреразрешающих гидродинамических моделей. Отмечается хорошее соответствие пространственно-временных характеристик двух типов струй Южного Каспия (распространяющихся по периферии циклонического круговорота над Дербентской впадиной в октябре–июне и вдоль восточного побережья в пределах примерно 50-метровой изобаты в июле–сентябре), выявленных в ходе спутникового мониторинга, результатам численного моделирования. По ежедневным картам ТПМ проекта GHRSSST (*англ.* Group for High Resolution Sea Surface Temperature) прослежено продвижение струи южнокаспийских вод в августе 2014 г. примерно до широты м. Песчаного и далее в виде более тонкой струи с меньшей ТПМ — до южного побережья п-ова Тюб-Караган. Оценка скорости распространения струи южнокаспийских вод по картам ТПМ (примерно 12–22 см/с на разных стадиях её продвижения на север) также хорошо согласуется с модельной среднемесячной скоростью (около 8–12 см/с). Необычная ситуация с распространением поперечной струи апвеллинга на север, наблюдавшаяся на последовательных спутниковых изображениях в сентябре 2003 г., объясняется с учётом известных инструментальных измерений структуры течений при неблагоприятном для апвеллинга ветре.

Ключевые слова: Каспийское море, Средний Каспий, Южный Каспий, сезонный прибрежный апвеллинг, адвекция вод, струйные течения, температура поверхности моря, спутниковые наблюдения, численное моделирование, вихреразрешающие гидродинамические модели

Одобрена к печати: 28.04.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-328-341

Введение

Каспийское море — самый крупный в мире замкнутый бассейн, изолированный от Мирового океана и простирающийся с севера на юг примерно на 1030 км при ширине 200–400 м (Водный..., 2016; Проект..., 1992; Kosarev, 2005). С учётом различий физико-географических условий этого вытянутого в меридиональном направлении бассейна, характера его донной топографии, зависимости термохалинных и биооптических характеристик поверхностного слоя от широты его обычно разделяют на Северный (мелководный, глубины менее 20 м), Средний (максимальная глубина 788 м) и Южный (максимальная глубина 1025 м) Каспий, с условными границами между Северным и Средним и Средним и Южным Каспием по линиям о. Чечень–м. Тюб-Караган и о. Жилой–м. Куули соответственно (Водный..., 2016; Проект..., 1992; Kosarev, 2005).

Каждая из этих трёх частей Каспийского моря, уникального природного бассейна с высоким биоразнообразием (Ginzburg et al., 2024), имеет характерные особенности динамики вод. Понимание общей циркуляции моря, её региональных особенностей и сезонной изменчивости важно с точки зрения задач экологии в условиях антропогенной нагрузки, связанной

с поступлением в море загрязняющих веществ с выносом рек, отходами нефтеразработок и интенсивным судоходством (Лаврова и др., 2022).

Схемы течений Каспийского моря, построенные разными авторами на основе различных данных в период с конца XIX в. до 1930-х гг. (гидрографические измерения, данные бутылочной почты, поплавков и др.), подробно рассмотрены в книге (Проект..., 1992). Общим элементом циркуляции для большинства этих схем является циклоническое движение вод в Среднем и Южном Каспии: на север вдоль восточного побережья моря и на юг вдоль западного. Циклонический круговорот зимой (в феврале) в Среднем Каспии отчётливо проявляется и на картах динамической топографии в монографии А. Н. Косарева (1975), построенных по результатам гидрологических съёмок 1960-х гг.

Летние измерения в прибрежной зоне у восточного побережья Среднего и Южного Каспия (Клевцова, 1967; Косарев, Жирнов, 1972) показали, что при преобладающих северных ветрах (северо-западных, северных, северо-восточных) течение вблизи поверхности в большинстве случаев направлено на юг, однако с глубиной оно может менять направление на противоположное. При юго-восточных и восточных ветрах вблизи поверхности и во всём слое воды здесь наблюдались течения северной четверти (Косарев, Жирнов, 1972). На основании этих наблюдений Косаревым и В. М. Жирновым (1972) был сделан вывод, что в тёплый сезон у восточного берега Среднего и Южного Каспия течения вблизи поверхности следуют за ветром, а в глубинных слоях (25–75 м) преобладают течения северных направлений, не связанные с местным ветром.

Инструментальные наблюдения течений проводились в основном в прибрежной зоне с глубиной менее 100 м, и сведения о циркуляции вод в глубинных районах основывались на расчёте динамическим методом с использованием доступных измерений температуры и солёности. С 1970-х гг. методом исследования среднегодовой и сезонной климатической циркуляции моря стало численное моделирование (например, (Кныш и др., 2008; Курдюмов, Оздой, 2004; Gunduz, Özsoy, 2014; Ibrayev et al., 2010; Kara et al., 2010; Tuzhilkin, Kosarev, 2005) и др.; см. также краткий обзор некоторых результатов моделирования в публикациях (Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015)). Результаты моделирования во многих работах подтверждают северное поверхностное течение у восточного побережья Среднего Каспия зимой (как часть циклонического круговорота), сменяющееся на южное и юго-западное летом.

Эффективным средством исследования крупномасштабной и мезомасштабной динамики вод вблизи поверхности моря является дистанционное зондирование, в частности, инфракрасные (ИК) и оптические спутниковые изображения с пространственным разрешением от 1 км до 20 м и возможностью проследить эволюцию элемента циркуляции с интервалом в день или несколько дней (в условиях безоблачной погоды). Именно спутниковые изображения продемонстрировали особенности крупномасштабной и мезомасштабной динамики вод (в основном в тёплый сезон из-за редких информативных спутниковых изображений зимой): распространение тёплых струеобразных потоков вод Южного Каспия по периферии циклонического круговорота в Среднем Каспии (Лаврова и др., 2011; Sur et al., 2000) или вдоль его восточного побережья в летне-осенний период (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015); поступление богатых хлорофиллом и взвесью струй из Северного Каспия в Средний (Гинзбург и др., 2006, 2025; Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015; Ginzburg et al., 2025); структуру и изменчивость апвеллинга у восточного и западного побережий Каспия (Гинзбург и др., 2005, 2006, 2025; Гусейнова и др., 2021; Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015; Монахова, Ахмедова, 2010; Хлебников и др., 2024; Ginzburg et al., 2025; Sur et al., 2000); мезомасштабные и субмезомасштабные вихревые структуры в разных районах Каспия (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015; Shipilova, 2000).

Спутниковая информация, дающая синоптическую картину циркуляции вод вблизи поверхности моря, может быть стимулом постановки задач численного моделирования и средством верификации его результатов. Наибольший интерес с точки зрения воспроизведения мезомасштабной динамики вод вблизи поверхности Каспия представляют численные вихреразрешающие модели с пространственным разрешением по горизонтали примерно 2–4 км (Дьяконов, Ибраев, 2019; Курдюмов, Оздой, 2004; Dyakonov, Ibrayev, 2019; Gunduz,

Özsoy, 2014). Предмет настоящего исследования — установление соответствия некоторых особенностей циркуляции поверхностных вод в восточной части Среднего Каспия в тёплый сезон (май—сентябрь), выявленных на основе дистанционного зондирования, немногочисленным натурным измерениям и известным результатам численного моделирования с использованием вихреразрешающих гидродинамических моделей.

Данные

Для иллюстрации мезомасштабной динамики Среднего Каспия использованы ИК-изображения, полученные со спутников NOAA-12 (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration), NOAA-15, NOAA-16 и NOAA-17 в разные годы (в том числе использованные в предыдущих работах авторов (Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015)), принятые станцией Морского гидрофизического института. Кроме того, были применены ежедневные безоблачные карты температуры поверхности моря (ТПМ) (*англ.* sea surface temperature — SST), созданные на основе анализа ТПМ проекта GHRSSST (*англ.* Group for High Resolution Sea Surface Temperature) уровня L4 MUR (*англ.* Multiscale Ultrahigh Resolution, многомасштабное сверхвысокое разрешение) с пространственным разрешением 1 км. Эти карты основаны на ночных наблюдениях ТПМ на поверхности и в подповерхностном слое с помощью нескольких приборов, включая усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр AMSR-E (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer) (NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) EOS (*англ.* Earth Observing System)), спектрометрический радиометр среднего разрешения MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на платформах NASA Aqua и Terra, микроволновый радиометр WindSat Военно-морских сил США и данные *in situ* измерений в рамках проекта NOAA iQuam (GHRSSST..., 2026). Информация о скорости и направлении ветра в Актау в сентябре 2003 г. была получена с сайта <http://www.gismeteo.ru>, в Туркменбаши в августе—сентябре 2014 г. — с сайта <https://tr5.ru>.

Элементы динамики вод по спутниковым изображениям, натурным измерениям и результатам численного моделирования

Струйные потоки из Южного Каспия в Средний Каспий

На спутниковых изображениях разных лет проявляются два типа вторжений более тёплых южнокаспийских вод в Средний Каспий, относящихся к разным сезонам. Один из них характерен для осенне-зимне-весеннего периода года (октябрь—июнь), когда южнокаспийские воды вовлекаются в движение по периферии циклонического круговорота над Дербентской впадиной, распространяясь сначала на север до 43–44° с. ш. (восточная ветвь потока, с максимальным контрастом температуры относительно прибрежных и поверхностных вод глубоководной части Среднего Каспия на широте примерно Апшеронского порога), затем поворачивают на запад и устремляются на юг вдоль западного склона. Примеры проявления этого потока южнокаспийских вод на спутниковых изображениях ИК- и оптического диапазонов в марте и апреле можно найти в работах (Лаврова и др., 2011; Sur et al., 2000), в октябре — в публикации (Лаврова и др., 2011). Фрагменты восточной ветви этого потока вдоль восточного побережья Среднего Каспия в январе и феврале видны на ИК-изображениях в статье (Ginzburg et al., 2025). Июньские ИК-изображения распространения южнокаспийских вод по периферии циклонического круговорота Среднего Каспия представлены на *рис. 1* (см. с. 331). Картины поверхностной циркуляции на данных изображениях интересны тем, что тёплая северная струя южнокаспийских вод соседствует с холодными водами прибрежного апвеллинга, где их движение направлено на запад и юго-запад (см. ниже). Заметим, что адвекция тёплых южнокаспийских вод в Средний Каспий отчётливо проявляется в климатических полях температуры (Косарев, Тужилкин, 1995) на горизонтах 0 м (с ноября по май) и 20 м (ноябрь—июнь). Области тёплых вод явно южнокаспийского происхожде-

ния в Среднем Каспии в мае и июне (в этом месяце при развитом апвеллинге у восточного побережья) видны также на среднемноголетних картах ТПМ, построенных осреднением ИК-данных MODIS/Aqua за 2003–2019 гг. (Гинзбург и др., 2020) и 2003–2021 гг. (Safarov et al., 2024). В работе (Gunduz, 2014) наложением спутниковых среднемесячных значений ТПМ на карты динамической топографии (рассчитанной по модели) для двух месяцев холодного периода (января и апреля, в отдельные годы в период 1993–2004 гг.) продемонстрирована значительная межгодовая изменчивость интенсивности циклонического круговорота в Среднем Каспии и распространения южнокаспийских вод по его периферии.

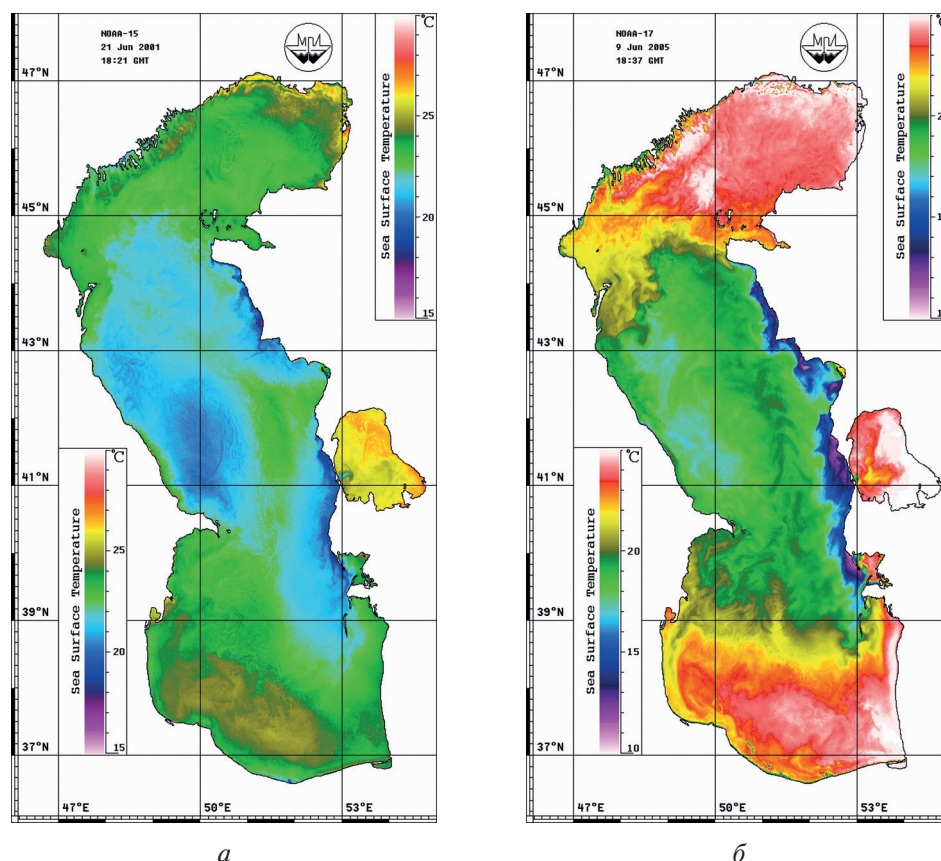


Рис. 1. ИК-изображения, полученные 21 июня 2001 г. со спутника NOAA-15 (а) и 9 июня 2005 г. с NOAA-17 (б)

Второй тип адвекции тёплых южнокаспийских вод в Средний Каспий — струи, движущиеся вдоль его восточного побережья в пределах примерно 50-метровой изобаты и наблюдающиеся в июле–сентябре (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015). Например, такая струя распространялась на север, постепенно сужаясь и теряя контраст с ТПМ окружающих вод, с $41^{\circ}18'$ с.ш. 1 августа до $42^{\circ}15'$ с.ш. 7 августа 2003 г. (рис. 3а и б в работе (Гинзбург и др., 2006); рис. 6.24а и б в книге (Лаврова и др., 2011)). Скорость её продвижения, оценённая по смещению головной части струи между последовательными ИК-изображениями 1 и 7 августа 2003 г., оказалась равной примерно 20 см/с. Положение (широта) северной границы таких струй и длительность их существования зависят, по-видимому, от направления и длительности благоприятного для их образования ветра (в данном случае восточного). Подобные струи не проявляются в климатических полях температуры (Косарев, Тужилкин, 1995), построенных на основе инструментальных измерений с низким пространственным разрешением, но отражены как характерный изгиб изотерм в Южном Каспии на среднемноголетних картах ТПМ июля–сентября (Гинзбург и др., 2020; Safarov et al., 2024).

В формировании и положении северной границы таких струй наблюдается заметная межгодовая изменчивость. Рекордным по распространению южнокаспийских вод на север на среднемесячных картах ТПМ июля – сентября в периоды 2003–2019 и 2003–2021 гг. оказался август 2014 г. (Гинзбург и др., 2020; Safarov et al., 2024) (рис. 2а). Анализ последовательности ежедневных спутниковых карт ТПМ Каспия (некоторые из них представлены на рис. 3, см. с. 333) показывает, что струя тёплых южнокаспийских вод, распространяющаяся с 1 августа 2014 г. примерно вдоль 50-метровой изобаты на север, к 23 августа 2014 г. достигла $43^{\circ}15'$ с.ш. (немного севернее м. Песчаного), а отходящая от неё тонкая струя с меньшим температурным контрастом относительно оставшегося пятна апвеллинговых вод достигла южного побережья п-ова Тюб-Караган (см. рис. 3а–г).

Примерная оценка средней скорости струи южнокаспийских вод по ежедневным картам ТПМ в период с 1 по 23 августа оказалась равной 12 см/с при достижении ею м. Песчаного и 18 см/с с учётом достижения тонкой струей южного побережья п-ова Тюб-Караган, а на начальном этапе продвижения струи на север с 1 по 5 августа — 22 см/с. По данным метеостанции в Туркменбаши, с 1 по 7 августа 2014 г. преобладали ветры с восточной компонентой, достигающие временами 9–10 м/с, далее наблюдались ветры переменных направлений, с 21 по 25 августа — преимущественно западных и северо-западных румбов, с частыми штилями, до конца месяца — разнонаправленные ветры с частой южной компонентой. Новое усиление ветров с восточной компонентой имело место с 2 по 6 сентября 2014 г.

После 24 августа северная часть струи южнокаспийских вод постепенно теряет когерентность, и к концу месяца её головная часть находится примерно на широте м. Санырлы ($42^{\circ}10'$ с.ш.) (см. рис. 3д). Однако с 7 сентября (см. рис. 3е), при усилившемся затоке холодных вод Среднего Каспия в Южный, заметно продвижение северной части струи с пониженной ТПМ на север: к 10 сентября она достигает широты м. Ракушечного (примерно $42^{\circ}50'$ с.ш.), а к 14 сентября — широты м. Песчаного. Таким образом, распространение струи южнокаспийских вод имеет импульсный характер, усиливаясь под влиянием благоприятного ветра (восточных румбов) или циркуляции вод, сложившейся под действием ветрового поля над всем бассейном Каспия. Продолжительность продвижения такой струи вдоль восточного побережья Среднего Каспия на север в августе 2014 г. составила примерно 20 дней. Ранее (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011) сообщалось о проявлении подобных струй на ИК-изображениях в течение одной-двух недель.

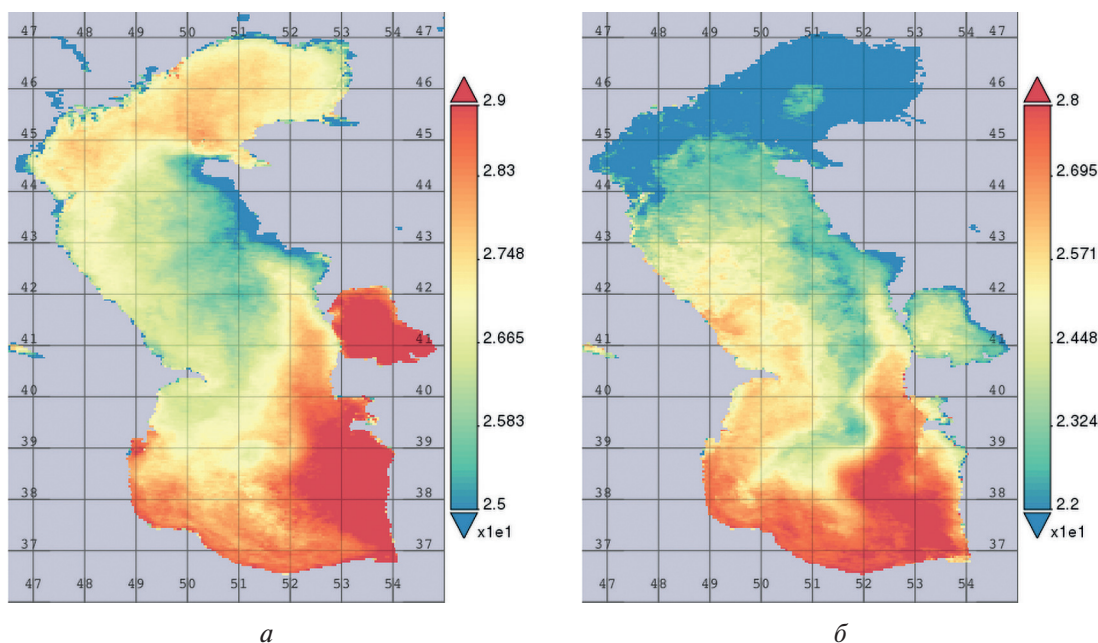


Рис. 2. Среднемесячные карты ТПМ Каспийского моря для августа (шкала от 25 до 29° C) (а) и сентября (шкала от 22 до 28° C) (б) 2014 г. (Гинзбург и др., 2020)

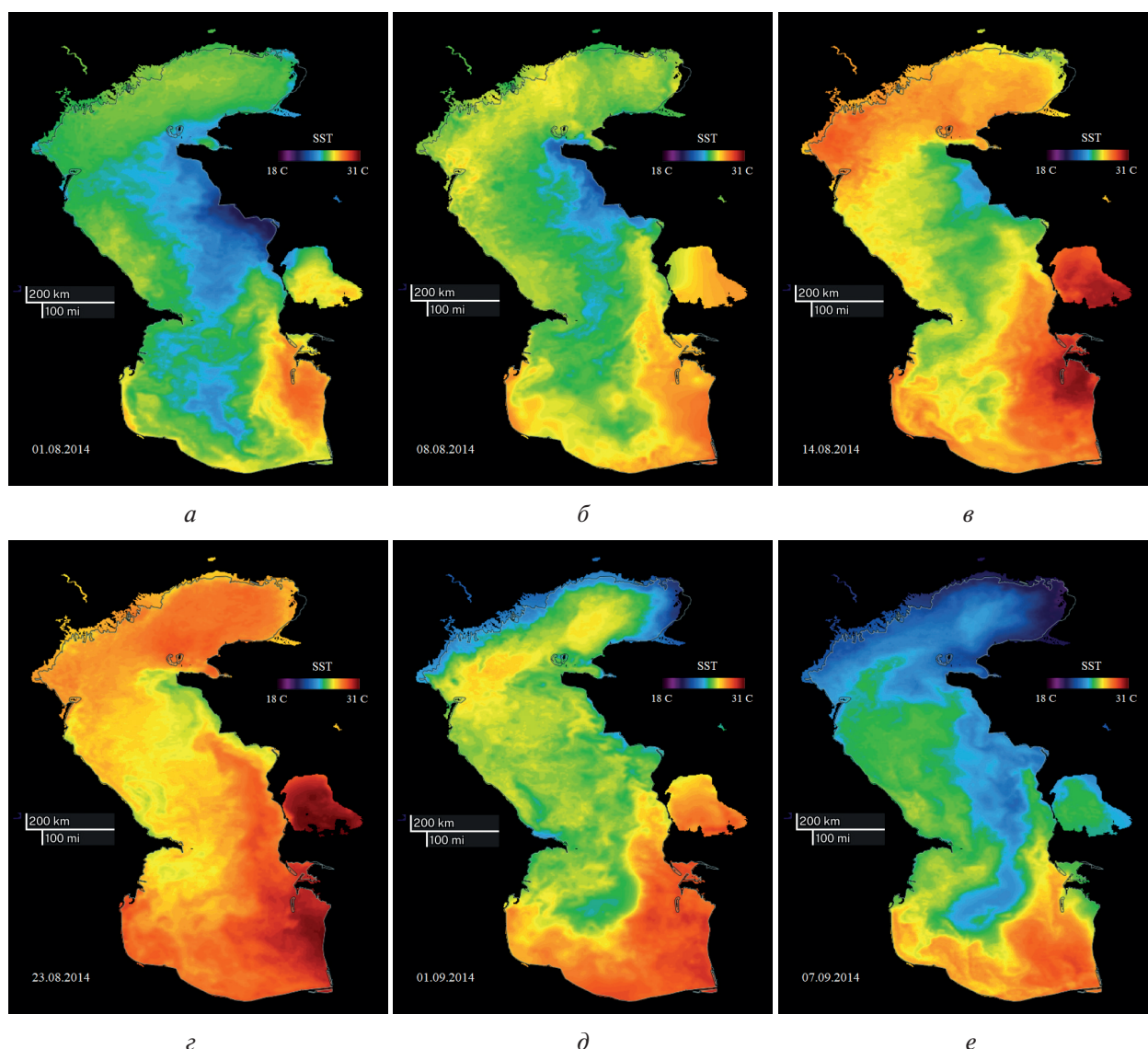


Рис. 3. Карты ТПМ Каспийского моря для 1, 8, 14, 23 августа (а–г) и 1, 7 сентября (д, е) 2014 г. (GHR SST, L4, MUR, worldview.earthdata.nasa.gov)

Отметим, что по мере продвижения струи южнокаспийских вод на север в августе 2014 г. южная граница зоны апвеллинга вдоль восточного побережья моря также смещалась на север, что подтверждает вывод в работах (Гинзбург и др., 2006, 2020; Лаврова и др., 2011; Safarov et al., 2024). В данном случае это смещение имело место при явном уменьшении интенсивности апвеллинга. Трансформированные воды апвеллинга могли распространяться до западного берега Южного Каспия (см. рис. 3а–в) или на юг до $37,2^\circ$ с. ш. (см. рис. 3а). Интенсивные заливы холодных вод из Среднего Каспия в Южный наблюдались в сентябре 2014 г. (см. рис. 2б, 3е).

Пространственные и временные различия двух типов адвекции вод из Южного Каспия в Средний очевидны: первый (см. рис. 1) наблюдается с октября по июнь, окаймляя глубоководную Дербентскую впадину, второй (см. рис. 2, 3) распространяется вдоль восточного берега в июле – сентябре в пределах примерно 50-метровой изобаты. Оба эти типа адвекции вод Южного Каспия в Средний находят подтверждение в расчётах по численной модели (Дьяконов, Ибраев, 2019) с высоким пространственным разрешением (примерно 2 км для описания мезомасштабной структуры течений), в которой реконструирована циркуляция Каспия в 2003 г. Выбор данного года был продиктован тем соображением, что в 2003 г.

поля скорости ветра в акватории Среднего и Южного Каспия во все месяцы хорошо согласовывались со среднеклиматическими. Модельные расчёты показали, что с февраля по середину июля, при преобладающих северных ветрах, в подповерхностном слое моря над Апшеронским порогом формируются северные течения с ядрами на глубинах 7–10 м, несущие тёплые южнокаспийские воды в Средний Каспий. Имея относительно низкую плотность, эти воды поднимаются на поверхность и проявляются в виде языка тёплых вод. Хорошо согласующееся модельное распределение ТПМ на горизонте 1 м для 31 марта 2003 г. и ИК-изображение поверхности моря для той же даты (рис. 6.18а в работе (Лаврова и др., 2011)) иллюстрируют распространение тёплых вод по периферии циклонического круговорота в Среднем Каспии (Дьяконов, Ибраев, 2019). С середины июля по октябрь, при преобладающих ветрах восточных румбов, в модели отчётливо проявляется северное течение в виде вытянутого языка тёплых вод вдоль изобат 10–60 м восточного шельфа (см. модельное распределение ТПМ для 1 августа 2003 г. на рис. 1d в публикации (Дьяконов, Ибраев, 2019) и приведённое там же ИК-изображение (рис. 6.24а в книге (Лаврова и др., 2011)) для той же даты). Полученные нами по ИК-изображениям (см. выше) оценки скорости продвижения головной части струи в августе 2014 г. (12–22 см/с на разных стадиях её развития) хорошо согласуются с модельной среднемесячной компонентой скорости северной струи (примерно 8–12 см/с) в работе (Дьяконов, Ибраев, 2019).

С использованием вихреразрешающей модели в исследовании (Dyakonov, Ibrayev, 2019) также получена «мгновенная» картина огибания потоком южнокаспийских вод циклонического круговорота в Среднем Каспии 1 марта 1976 г.

Сезонный прибрежный апвеллинг у восточного побережья Среднего Каспия

Сезонный апвеллинг (подъём холодной воды к поверхности из подповерхностных слоёв) — давно и хорошо известная особенность динамики вод у восточного побережья Каспия в тёплый период года (с середины мая до середины октября) при преобладающих северо-западных ветрах (Архипкин, 1990; Косарев, 1975; Проект..., 1992). Использование спутниковой информации с хорошим пространственно-временным разрешением дало возможность получать синоптическую картину апвеллинга на обширной акватории протяжённостью около 600 км от п-ова Тюб-Караган до п-ова Туркменбаши (иногда до о. Огурчинского, рис. 4в, см. с. 335) с мая по сентябрь (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015; Хлебников и др., 2024; Kostianoy et al., 2019; Sur et al., 2000) и исследовать структуру локальных многофронтальных зон апвеллинга. Спутниковые изображения сделали очевидным образование сопровождающих апвеллинг холодных поперечных (направленных на запад и юго-запад) струй (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011; Sur et al., 2000), типичных для многих прибрежных апвеллинговых зон Мирового океана ((Федоров, Гинзбург, 1988; Brink, 1983) и др.) и являющихся эффективным механизмом горизонтального водообмена между водами прибрежной апвеллинговой зоны и открытого моря. Однако, как показал анализ синхронных спутниковых изображений ТПМ и хлорофилла *a* (Востоков и др., 2006; Гинзбург и др., 2025; Лаврова и др., 2011; Хлебников и др., 2024; Ginzburg et al., 2025), поверхностные воды зоны прибрежного апвеллинга у восточного побережья Каспия, в отличие от большинства прибрежных апвеллинговых зон Мирового океана, характеризуются низким содержанием хлорофилла.

Изменчивость мезомасштабной структуры зоны апвеллинга с образованием холодных поперечных струй у восточного побережья Среднего Каспия в пределах одного тёплого сезона продемонстрирована моделированием циркуляции Каспийского моря с использованием вихреразрешающей модели (Gunduz, Özsoy, 2014). Мгновенная модельная картина прибрежного апвеллинга от м. Тюб-Караган до о. Огурчинского для 1 июля 1973 г. получена также в исследовании (Dyakonov, Ibrayev, 2019).

В публикациях (Курдюмов, Оздой, 2004; Gunduz, Özsoy, 2014) отмечается особенность течений у восточного побережья Среднего Каспия в летний сезон, при преобладающих север-

ных ветрах и развитием апвеллинга: южное береговое течение в поверхностном слое сменяется на северное подповерхностное, являющееся частью циклонического круговорота (см. также работы (Клевцова, 1967; Косарев, Жирнов, 1972), основанные на инструментальных измерениях). Следовательно, можно ожидать, что в ситуациях, когда циклонический круговорот в начале лета (июнь) ещё проявляется на спутниковых ИК-изображениях (см. *рис. 1*), течения в подповерхностном слое в восточной ветви круговорота и в зоне прибрежного апвеллинга направлены в одну и ту же сторону, на север.

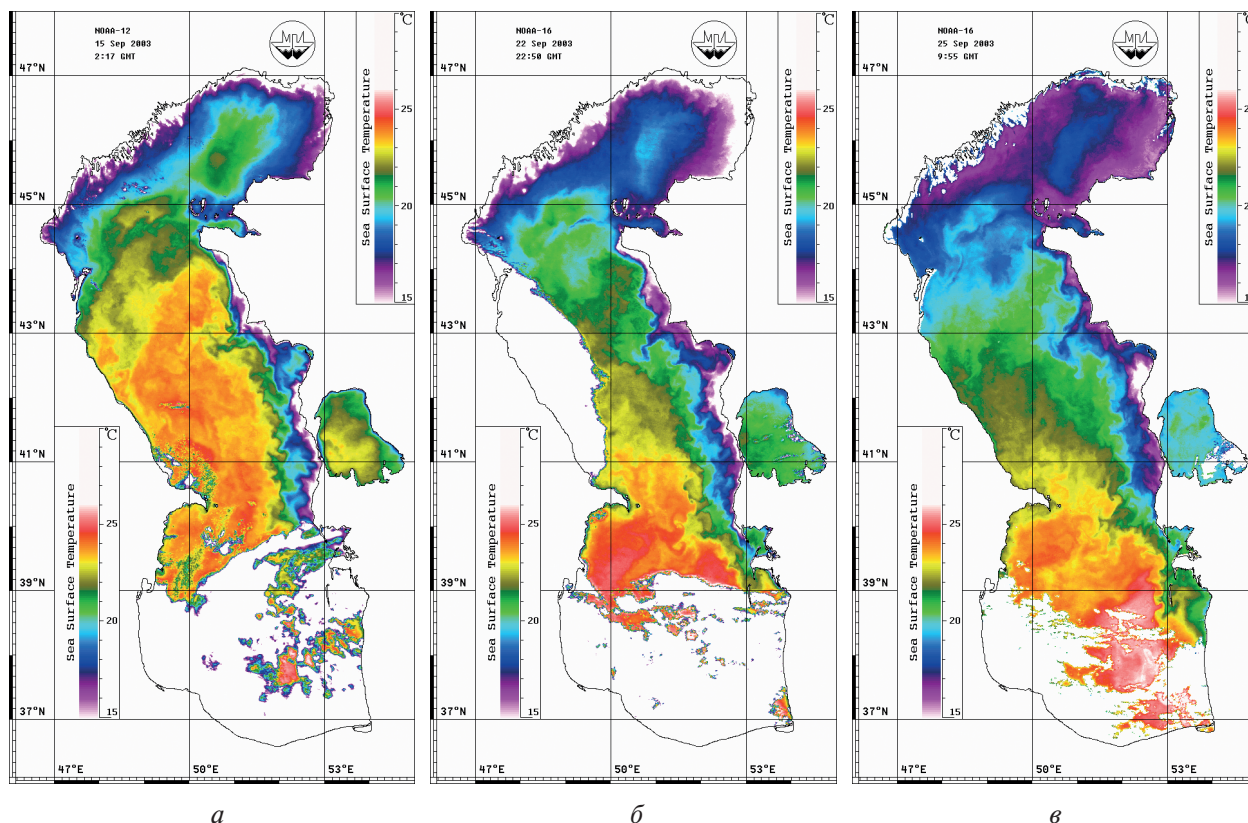


Рис. 4. ИК-изображения, полученные в сентябре 2003 г.: а — 15-го, NOAA-12; б — 22-го, NOAA-16; в — 25-го, NOAA-16 (Лаврова и др., 2011)

Представление о вертикальной структуре течений в зоне прибрежного апвеллинга в Среднем Каспии дают модельные вертикальные разрезы среднemesячных значений температуры, зональной и меридиональной компоненты скорости в слое 0–50 м для июля на широте 42° с.ш. в работе (Курдюмов, Оздой, 2004). Продемонстрирована структура зональной компоненты скорости: движение холодных апвеллинговых вод от берега в сторону открытого моря в поверхностном слое толщиной 5–7 м, ниже — противотечение к берегу (на глубине 5–15 м и глубже), а под ним — течение в северо-западном направлении и даунвеллинг на глубинах более 20–30 м. При этом вдольбереговое течение сменяется с южного на поверхности на северное под ним.

Эта модельная структура течений хорошо согласуется с результатами инструментальных измерений в июле 1967 г. у восточного побережья Среднего Каспия (Косарев, Жирнов, 1972). При преобладающих ветрах северной четверти, благоприятных для апвеллинга, в верхнем 10-метровом слое у берега наблюдались в основном южные течения, на мористых станциях — западные и юго-западные течения со скоростью 20–50 см/с, а в слое 25–50 м преобладали юго-восточные, восточные и восточно-северо-восточные течения (подток к берегу) со скоростью от 10 до 25 см/с.

Иная динамическая ситуация наблюдалась в том же районе при съёмке в июле 1968 г. (Косарев, Жирнов, 1972), при ветрах юго-восточного и восточного направлений со скоростью 5–6 м/с или слабых переменных. Холодная температурная аномалия у восточного берега (апвеллинг) почти отсутствовала, а на поверхности преобладали северные и северо-западные течения со скоростью до 40 см/с, причём течения северной четверти преобладали во всём слое воды. Иллюстрацией подобной ситуации может быть последовательность спутниковых ИК-изображений на *рис. 4* (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011). Основание поперечной струи апвеллинга длиной около 100 км при преобладающих восточных и юго-восточных ветрах 4–7 м/с в районе Актау с 13 по 15 и с 22 по 27 сентября 2003 г. (с 18 по 21 сентября — ветер северных румбов) смещалось на север. Скорость перемещения основания струи между 22 и 25 сентября при неизменном положении её головной части, где предположительно находился циклонический вихрь с диаметром примерно 20 км (см. *рис. 4б* и *в*), была равна примерно 17 см/с. Очевидно и уменьшение интенсивности апвеллинга (кроме юго-восточной части Казахского зал.) между 22 и 25 сентября 2003 г.

Заключение

В тёплый период года акватория Среднего Каспия находится между более тёплыми (в мае — июле)/менее солёными водами Северного Каспия и более тёплыми и солёными водами Южного Каспия. Изменчивость термохалинных характеристик и циркуляции вод в восточной части этой акватории, лишённой речного стока, помимо обусловленности изменением климата и атмосферным воздействием (как и всего Каспия), в значительной степени определяется локальными мезомасштабными динамическими процессами: адвекцией струйных потоков опреснённых вод из Северного Каспия и тёплых/солёных вод из Южного Каспия, а также выносом к поверхности из подповерхностных горизонтов более холодных и солёных вод в районе прибрежного апвеллинга, с распространением трансформированных апвеллинговых вод в центральную часть Среднего Каспия.

Задачей настоящего исследования было сопоставление выявленных спутниковыми наблюдениями особенностей динамики струйных потоков из Южного Каспия в Средний и течений, связанных с прибрежным апвеллингом, с известными измерениями *in situ* и соответствующей модельной картиной. Вопрос, связанный с динамикой и моделированием струйных потоков из Северного Каспия в Средний, будет рассмотрен в другой статье.

Результаты численного моделирования структуры течений на границе между Средним и Южным Каспием (над Апшеронским порогом) в работе (Дьяконов, Ибраев, 2019) хорошо согласуются с результатами нашего анализа спутниковых изображений (см. *рис. 1–3* и спутниковые изображения в публикациях (Гинзбург и др., 2006; Лаврова и др., 2011; Лебедев и др., 2015)) по сезонам проявления двух типов (условно «зимнего» и «летне-осеннего») струйных потоков южнокаспийских вод в Среднем Каспии и по оценкам скорости продвижения летне-осенней струи на север в августе 2003 и 2014 гг. (см. выше).

Южнокаспийские струи отличаются от среднекаспийских вод не только более высокой температурой, но и повышенной солёностью. Существующие в настоящее время спутниковые измерения солёности не имеют достаточного разрешения, чтобы получать распределение данного параметра, аналогичного ИК-изображениям. Такую возможность может дать численное моделирование с использованием вихреразрешающих моделей. Мгновенные модельные картины солёности при распространении южнокаспийских вод в Среднем Каспии 1 августа 1974 г. до Казахского зал. (м. Ракушечного) и 1 июля 1975 г. до м. Песчаного представлены в работе (Dyakonov, Ibrayev, 2019). К сожалению, соответствующее распределение ТПМ для этих дат отсутствует. По оценкам Г.С. Дьяконова и Р.А. Ибраева (2019), модельные струйные потоки южнокаспийских вод вдоль восточного побережья Среднего Каспия с июля по октябрь, после половодья на р. Волге, когда вдоль его западного побережья распространяются опреснённые воды северокаспийского происхождения, существенно восполняют солевой баланс Среднего Каспия: за 100 дней солёность его поверхностных вод увеличивается на 0,5 ‰.

Моделирование с использованием вихреразрешающих моделей позволяет воспроизводить динамику прибрежного апвеллинга в течение заданного модельного периода (Gunduz, Özsoy, 2014). Полученная Д. Г. Курдюмовым и Э. Озоем (2004) в численном эксперименте структура течений в зоне прибрежного апвеллинга в верхнем 50-метровом слое согласуется с данными инструментальных измерений Косарева и Жирнова (1972). Результаты гидрологической съёмки в июле 1968 г. в работе (Косарев, Жирнов, 1972) помогли нам понять необычную ситуацию с северным течением в зоне прибрежного апвеллинга в районе м. Песчаного в сентябре 2003 г. при смене благоприятного для апвеллинга ветра на неблагоприятный (см. рис. 4).

Рассмотренные примеры исследования мезомасштабных элементов динамики вод в восточной части Среднего Каспия позволяют сделать вывод, что наиболее цельную картину конкретного мезомасштабного процесса в поверхностном слое моря может дать совместный анализ спутниковых данных, результатов инструментальных измерений (к сожалению, эпизодических) и численного моделирования с использованием вихреразрешающих гидродинамических моделей.

Работа выполнена в рамках темы госбюджета FMWE-2024-0016 «Разномасштабные гидрофизические процессы в Мировом океане и его пограничных слоях: их исследование методами оперативной океанографии, судовых наблюдений, дистанционного зондирования, теоретического, численного и лабораторного моделирования».

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. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / под ред. Е. С. Нестерова. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
3. Востоков С. В., Долгова А. О., Сивкович А. Е. Мониторинг пространственно-временной изменчивости фитопланктона на акватории Каспийского моря по данным спутникового зондирования // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2006. № 11. С. 60–67.
4. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Соловьев Д. М., Шеремет Н. А. Структура апвеллинга у западного побережья Среднего Каспия (по спутниковым наблюдениям) // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 76–85.
5. 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.
6. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А. Динамика зоны апвеллинга у восточного побережья Каспия в сезонном цикле (май–сентябрь) по спутниковым среднесезонным температурным данным (2003–2019) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 215–226. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-215-226.
7. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А., Соловьев Д. М. Связь сезонного распределения хлорофилла-а и взвешенного вещества у восточного побережья Среднего Каспия с локальной мезомасштабной динамикой вод // Материалы 23-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2025. С. 223. DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
8. Гусейнова Н. О., Багомаев А. А., Ахмедова Л. Ш., Курамагомедов Б. М. Изучение апвеллинга по содержанию хлорофилла *a* в фитопланктоне западного Каспия за 2017 г. по данным дистанционного зондирования // Юг России: экология, развитие. 2021. Т. 16. № 4. С. 159–172. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-4-159-172.
9. Дьяконов Г. С., Ибраев Р. А. Динамика вод Каспийского моря над Апшеронским порогом в 2003 году // Морской гидрофиз. журн. 2019. Т. 35. № 6. С. 633–645. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-6-633-645.
10. Клевцова Н. Д. Режим течений у восточного побережья Среднего и Южного Каспия // Сб. работ Бакинской гидрометеорологической обсерватории. 1967. Вып. 3. С. 44–49.
11. Кыш В. В., Ибраев Р. А., Кортаев Г. К., Инюшина Н. В. Сезонная изменчивость климатических течений Каспийского моря, восстановленная ассимиляцией климатической температуры и солёности в модели циркуляции вод // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 251–265.
12. Косарев А. Н. Гидрология Каспийского и Аральского морей. М.: МГУ, 1975. 272 с.

13. Косарев А. Н., Жирнов В. М. О прибрежных течениях у восточного берега Каспия // Сб. «Комплексные исследования Каспийского моря». М.: Изд-во МГУ, 1972. Вып. 3. С. 111–120.
14. Косарев А. Н., Тужилкин В. С. Климатические термохалинные поля Каспийского моря. М.: ГОИН, МГУ, 1995. 91 с.
15. Курдюмов Д. Г., Озкой Э. Среднемесячные характеристики внутригодовой изменчивости циркуляции вод Каспийского моря, полученные по вихреразрешающей термогидродинамической модели // Океанология. 2004. Т. 14. № 6. С. 843–853.
16. 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. 480 с.
17. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы исследования изменчивости Каспийского моря. М.: ИКИ РАН, 2022. 250 с.
18. Лебедев С. А., Костяной А. Г., Гинзбург А. И. Динамика Каспийского моря по данным инструментальных измерений, результатам моделирования и данным дистанционного зондирования // Материалы 3-й Международ. научно-практич. конф. «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет», 2015. С. 146–179.
19. Монахова Г. А., Ахмедова Г. А. Подъем глубинных вод у западного побережья Среднего Каспия // Науч. журн. КубГАУ. 2010. № 63(09). С. 334–345.
20. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / отв. ред. Ф. С. Терзиев. СПб: Гидрометеиздат, 1992. 358 с.
21. Федоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
22. Хлебников Д. В., Иванов А. Ю., Жукова М. А., Клименко С. К. Наблюдение апвеллингов у западного и восточного берегов Каспийского моря летом 2024 г. дистанционными методами: мультисенсорный подход // Материалы 22-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2024. С. 369. DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
23. Brink K. H. The near-surface dynamics of coastal upwelling // Progress in Oceanography. 1983. V. 12. No. 3. P. 223–257. DOI: 10.1016/0079-6611(83)90009-5.
24. Dyakonov G. S., Ibrayev R. A. Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model // Ocean Science. 2019. V. 15. P. 527–541. <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>.
25. GHRSSST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1). PO.DAAC, 2026. DOI: 10.5067/GHGM-4FJ04.
26. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Gholamalifard M. et al. Ecologically and biologically significant marine protected areas in the Caspian Sea: A review // Ecologica Montenegrina. 2024. V. 76. P. 85–115. <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.6>.
27. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. et al. Mesoscale water dynamics and Chlorophyll-*a*/TSM/SST distributions off the Eastern Coast of the Middle Caspian // Ecologica Montenegrina. 2025. V. 85. P. 40–65. <https://doi.org/10.37828/em.2025.85.3>.
28. Gunduz M. Caspian Sea surface circulation variability inferred from satellite altimeter and sea surface temperature // J. Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119. P. 1420–1430. DOI: 10.1002/2013JC009558.
29. Gunduz M., Özsoy E. Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea // Ocean Science. 2014. V. 10. P. 459–471. DOI: 10.5194/os-10-459-2014.
30. Ibrayev R. A., Özsoy E., Schrum C., Sur H. İ. Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction // Ocean Science. 2010. V. 6. P. 311–329. DOI: 10.5194/os-6-311-2010.
31. Kara A. B., Wallcraft A. J., Metzger E. J., Gunduz M. Impacts of freshwater on the seasonal variations of surface salinity and circulation in the Caspian Sea // Continental Shelf Research. 2010. V. 30. P. 1211–1225.
32. Kosarev A. N. Physico-geographical conditions of the Caspian Sea // The Caspian Sea Environment / eds. A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev. Ser. Handbook of Environmental Chemistry. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. V. 5. Pt. P. P. 5–31. DOI: 10.1007/698_5_002.
33. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu. et al. Comprehensive satellite monitoring of Caspian Sea conditions // Remote Sensing of the Asian Seas / eds. V. Barale, M. Gade. Cham: Springer, 2019. P. 505–521. DOI: 10.1007/978-3-319-94067-0_28.
34. Safarov S., Kamran K. V., Ismayilov V., Safarov E. Detection of upwelling events in the Caspian Sea using thermal satellite image processing // Intern. J. Engineering and Geosciences. 2024. V. 9. No. 2. P. 247–255. DOI: 10.26833/ijeg.1394363.
35. Shipilova L. M. Eddy formation in the Caspian Sea // Dynamic Earth Environment. Remote Sensing Observations from Shuttle-Mir Missions / eds. K. P. Lilla, L. V. Dessinov. N. Y.: John Wiley and Sons, Inc., 2000. P. 211–219.
36. Sur H. I., Özsoy E., Ibrayev R. Satellite-derived flow characteristics of the Caspian Sea // Satellites, Oceanography and Society / ed. D. Halpern. Elsevier Oceanography Series. V. 63. Elsevier, 2000. P. 289–297.

37. 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. Ser. Handbook of Environmental Chemistry. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. V. 5. Pt. P. P. 33–57. DOI: 10.1007/698_5_003.

Elements of mesoscale water dynamics in the eastern part of the Middle Caspian: satellite observations, *in situ* measurements, modeling results

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 Moscow Witte University, Moscow 115432, Russia

³ Maykop State Technological University, Maykop 385000, Russia

The paper compares certain elements of mesoscale circulation of surface waters in the eastern Middle Caspian (warm jet streams from the South to the Middle Caspian and currents in the coastal upwelling zone) identified through the analysis of satellite images of sea surface temperature (SST) from different years, with known results of *in situ* measurements and numerical modeling using eddy-resolving hydrodynamic models. Good agreement is noted between the spatiotemporal characteristics of two types of jets in the South Caspian (propagating along the periphery of the cyclonic gyre over the Derbent Depression in October–June and along the eastern coast within approximately the 50-meter isobath in July–September) identified during satellite monitoring, and the results of numerical modeling. Using daily SST maps from the GHR SST (Group for High Resolution Sea Surface Temperature) project, the movement of the South Caspian water jet was traced in August 2014 to approximately the latitude of Cape Peschaniy and then, in the form of a thinner jet with lower SST, to the southern coast of the Tyub-Karagan Peninsula. The estimated propagation velocity of the South Caspian jet based on SST maps (approximately 12–22 cm/s at different stages of its northward progress) also agrees well with the model-estimated average monthly velocity (approximately 8–12 cm/s). The unusual northward propagation of the transverse upwelling jet observed in successive satellite images in September 2003 can be explained by taking into account known instrumental measurements of the current structure during winds unfavorable for upwelling.

Keywords: Caspian Sea, Middle Caspian Sea, South Caspian Sea, seasonal coast upwelling, water advection, jet streams, sea surface temperature, satellite observations, numerical modeling, eddy-resolving hydrodynamic models

Accepted: 28.04.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-3-328-341

References

1. Arkhipkin V.S., Features of the structure and dynamics of coastal upwelling in the Caspian Sea, In: *Kaspiiskoe more. Struktura i dinamika vod* (Caspian Sea. Water structure and dynamics), Moscow: Nauka, 1990, pp. 61–74 (in Russian).
2. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* (Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecasting), E. S. Nesterov (ed.), Moscow: Triada Ltd, 2016, 378 p. (in Russian).
3. Vostokov S. V., Dolgova A. O., Sivkovich A. Ye., Monitoring of spatiotemporal variability of phytoplankton in the Caspian Sea using satellite sensing data, *Environmental Protection in the Oil and Gas Industry*, 2006, No. 11, pp. 60–67 (in Russian).
4. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Solov'yev D. M., Sheremet N. A., Upwelling structure off the western coast of the Middle Caspian (based on satellite observations), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 4, pp. 76–85 (in Russian).

5. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Solovyev D. M., Sheremet N. A., Frontal zone of upwelling near the eastern coast of the Caspian Sea as inferred from satellite data, *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 4, pp. 3–12 (in Russian).
6. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Dynamics of the upwelling zone near the eastern coast of the Caspian Sea in the seasonal cycle (May–September) based on satellite average long-term temperature data (2003–2019), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 7, pp. 215–226, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-215-226 (in Russian).
7. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A., Solov'yev D. M., Relationship between seasonal distribution of chlorophyll-a and suspended matter off the eastern coast of the Middle Caspian Sea and local mesoscale water dynamic, *Materialy 23-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 23rd Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2025, p. 223 (in Russian), DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.
8. Guseynova N. O., Bagomayev A. A., Akhmedova L. Sh., Kuramagomedov B. M., Study of upwelling by the content of chlorophyll *a* in phytoplankton of the western Caspian Sea for 2017 based on remote sensing data, *Yug Rossii: ehkologiya, razvitie*, 2021, V. 16, No. 4, pp. 159–172 (in Russian), DOI: 10.18470/1992-1098-2021-4-159-172.
9. Dyakonov G. S., Ibraev R. A., Dynamics of the Caspian Sea waters above the Absheron threshold in 2003, *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2019, V. 35, No. 6, pp. 633–645 (in Russian), DOI: 10.22449/0233-7584-2019-6-633-645.
10. Klevtsova N. D., Current regime off the eastern coast of the Middle and Southern Caspian, *Sbornik rabot Bakinskoi gidrometobservatorii*, 1967, Iss. 3, pp. 44–49 (in Russian).
11. Knysh V. V., Ibrayev R. A., Korotayev G. K., Inyushina N. V., Seasonal variability of climatic currents of the Caspian Sea, reconstructed by assimilation of climatic temperature and salinity in the water circulation model, *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2008, V. 44, No. 2, pp. 251–265 (in Russian).
12. Kosarev A. N., *Gidrologiya Kaspiiskogo i Aral'skogo morei* (Hydrology of the Caspian and Aral Seas), Moscow: Moscow State University Press, 1975, 272 p. (in Russian).
13. Kosarev A. N., Zhirnov V. M., On coastal currents off the eastern coast of the Caspian Sea, *Sbornik "Kompleksnye issledovaniya Kaspiiskogo morya"*, Moscow: Moscow State University Press, 1972, Iss. 3, pp. 111–120 (in Russian).
14. Kosarev A. N., Tuzhilkin V. S., *Klimaticheskie termohalinnye polya Kaspiiskogo morya* (Climatic thermohaline fields of the Caspian Sea), Moscow: GOIN, Moscow State University, 1995, 91 p. (in Russian).
15. Kurdyumov D. G., Özsoy E., Average monthly characteristics of intra-annual variability of the Caspian Sea water circulation obtained using an eddy-resolving thermohydrodynamic model, *Okeanologiya*, 2004, V. 14, No. 6, pp. 843–853 (in Russian).
16. Lavrova O. Yu., Kostyanoy 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 RAS, 2011, 480 p. (in Russian).
17. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoy A. G., *Sputnikovye metody issledovaniya izmenchivosti Kaspiiskogo morya* (Satellite methods for studying the variability of the Caspian Sea), Moscow: IKI RAS, 2022, 250 p. (in Russian).
18. Lebedev S. A., Kostyanoy A. G., Ginzburg A. I., Dynamics of the Caspian Sea based on instrumental measurements, modeling results and remote sensing data, *Materialy 3-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoehkologii s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii"* (Proc. 3rd Intern. Scientific and Practical Conf. "Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geoecology Using Modern Information Technologies"), Maykop State Technological University, 2015, pp. 146–179 (in Russian).
19. Monakhova G. A., Akhmedova G. A., Rise of deep waters off the western coast of the Middle Caspian Sea, *Nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2010, No. 63(09), pp. 334–345 (in Russian).
20. *Proekt "Morya". Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei. T. 6. Kaspiiskoe more. Vypusk 1. Gidrometeorologicheskie usloviya* (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. V. 6. The Caspian Sea. Iss. 1. Hydrometeorological conditions), F. S. Terziev (ed.), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 358 p. (in Russian).
21. Fedorov K. N., Ginzburg A. I., *Prioverkhnostnyi sloi okeana* (The near-surface layer of the ocean), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988, 303 p. (in Russian).
22. Khlebnikov D. V., Ivanov A. Yu., Zhukova M. A., Klimenko S. K., Remote sensing of upwelling events off the western and eastern shores of the Caspian Sea in summer 2024: A multisensory approach, *Materialy 22-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 22nd Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2024, p. 369 (in Russian), DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
23. Brink K. H., The near-surface dynamics of coastal upwelling, *Progress in Oceanography*, 1983, V. 12, No. 3, pp. 223–257, DOI: 10.1016/0079-6611(83)90009-5.

24. Dyakonov G. S., Ibrayev R. A., Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean eddy resolving ocean general circulation model, *Ocean Science*, 2019, V. 15, pp. 527–541, <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>.
25. *GHR SST Level 4 MUR Global Foundation Sea Surface Temperature Analysis (v4.1)*, PO.DAAC, 2026, DOI: 10.5067/GHGMR-4FJ04.
26. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Gholamalifard M. et al., Ecologically and biologically significant marine protected areas in the Caspian Sea: A review, *Ecologica Montenegrina*, 2024, V. 76, pp. 85–115, <https://doi.org/10.37828/em.2024.76.6>.
27. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Sheremet N. A. et al., Mesoscale water dynamics and Chlorophyll-*a*/TSM/SST distributions off the Eastern Coast of the Middle Caspian, *Ecologica Montenegrina*, 2025, V. 85, pp. 40–65, <https://doi.org/10.37828/em.2025.85.3>.
28. Gunduz M., Caspian Sea surface circulation variability inferred from satellite altimeter and sea surface temperature, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, V. 119, pp. 1420–1430, DOI: 10.1002/2013JC009558.
29. Gunduz M., Özsoy E., Modelling seasonal circulation and thermohaline structure of the Caspian Sea, *Ocean Science*, 2014, V. 10, pp. 459–471, DOI: 10.5194/os-10-459-2014.
30. Ibrayev R. A., Özsoy E., Schrum C., Sur H. İ., Seasonal variability of the Caspian Sea three-dimensional circulation, sea level and air-sea interaction, *Ocean Science*, 2010, V. 6, pp. 311–329, DOI: 10.5194/os-6-311-2010.
31. Kara A. B., Wallcraft A. J., Metzger E. J., Gunduz M., Impacts of freshwater on the seasonal variations of surface salinity and circulation in the Caspian Sea, *Continental Shelf Research*, 2010, V. 30, pp. 1211–1225.
32. Kosarev A. N., Physico-geographical conditions of the Caspian Sea, In: *The Caspian Sea Environment*, A. G. Kostianoy, A. N. Kosarev (eds.), Ser. Handbook of Environmental Chemistry, Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, V. 5, Pt. P, pp. 5–31, DOI: 10.1007/698_5_002.
33. Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., Lavrova O. Yu. et al., Comprehensive Satellite Monitoring of Caspian Sea Conditions, In: *Remote Sensing of the Asian Seas*, V. Barale, M. Gade (eds.), Cham: Springer, 2019, pp. 505–521, DOI: 10.1007/978-3-319-94067-0_28.
34. Safarov S., Kamran K. V., Ismayilov V., Safarov E., Detection of upwelling events in the Caspian Sea using thermal satellite image processing, *Intern. J. Engineering and Geosciences*, 2024, V. 9, No. 2, pp. 247–255, DOI: 10.26833/ijeg.1394363.
35. Shipilova L. M., Eddy formation in the Caspian Sea, In: *Dynamic Earth Environment. Remote Sensing Observations from Shuttle-Mir Missions*, K. P. Lilla, L. V. Dessinov (eds.), New York: John Wiley and Sons, Inc., 2000, pp. 211–219.
36. Sur H. İ., Özsoy E., Ibrayev R., Satellite-derived flow characteristics of the Caspian Sea, In: *Satellites, Oceanography and Society*, D. Halpern (ed.), Elsevier Oceanography Series, V. 63, Elsevier, 2000, pp. 289–297.
37. 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.), Ser. Handbook of Environmental Chemistry, Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, V. 5, Pt. P, pp. 33–57, DOI: 10.1007/698_5_003.