

УДК 531.752.674.2 (262.81)

UDC 531.752.674.2 (262.81)

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ АПВЕЛЛИНГА У ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ СРЕДНЕГО КАСПИЯ ЛЕТОМ 2011 ГОДА**

**ABOUT THE PECULIARITIES OF THE UPWELLING AT THE WESTERN COAST OF THE MIDDLE CASPIAN IN THE SUMMER OF 2011**

Монахова Галина Анатольевна  
к.б.н.

Monakhova Galina Anatolyevna  
Cand.Biol.Sci.

Курамагомедов Башир Магомедович  
аспирант  
*Дагестанский государственный университет,  
Махачкала, Россия*

Kuramagomedov Bashir Magomedovich  
postgraduate student  
*Dagestan State University, Makhachkala, Russia*

Приводятся результаты комплексного анализа апвеллинга у западного побережья Среднего Каспия летом 2011 г. по данным наблюдений, полученным с применением контактных и дистанционных методов

The article contains the results of the complex analysis of the upwelling at the Western coast of the Middle Caspian in the summer of 2011, according to the data of observations, obtained with the use of contact and remote methods

Ключевые слова: СРЕДНИЙ КАСПИЙ, АПВЕЛЛИНГ, КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ, ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ, ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ

Keywords: MIDDLE CASPIAN, UPWELLING, CONTACT METHODS, REMOTE METHODS, WEATHER CONDITIONS, HYDROCHEMICAL CONDITIONS, BIOLOGICAL PRODUCTIVITY

Известно, что внутренний водообмен в крупных водоемах является одним из основных факторов, влияющих на функционирование и биологическую продуктивность водных экосистем. Между тем он является наименее изученной чертой гидрологического режима Каспийского моря. Можно только предполагать, что на Каспии, так же, как в других морях, активную роль в поставке биогенных элементов в зону фотосинтеза играет подъем глубинных вод (апвеллинг). Апвеллинг наблюдается, в основном, у восточного и западного побережья Среднего Каспия и может быть идентифицирован по изменению термогалинной структуры вод (в основном, по отрицательной температурной аномалии в летний сезон).

Принято считать, что у восточного побережья апвеллинг носит сезонный (наблюдается практически в течение всего лета) и мезомасштабный характер, а у западного побережья – синоптический и микромасштабный. Между тем отдельные сведения позволяют судить о том, что выход глубинных вод наблюдается не только летом, но и в остальные сезоны года

[12, 5], а благодаря спутниковым данным стало ясно, что подъем глубинных вод - явление чаще мезомасштабное. Из этого следует, что его роль в вертикальной циркуляции вод, в формировании гидрохимического режима и биологической продуктивности Каспийского моря, как минимум, сопоставима с ролью конвективного перемешивания. Однако, исследований, посвященных изучению роли апвеллинга в жизни Каспия, до сих пор не проводилось.

Впервые в научной литературе прибрежный апвеллинг на Каспии был упомянут в 1877 г. [6], а широкомасштабные его исследования были начаты еще в 60-е гг. прошлого столетия. Они подробно освещены нами в работе [11]. Для объяснения апвеллинга к настоящему времени предложено две гипотезы: ветровая и волновая (из истории исследований Каспийского моря известно также о попытке объяснить температурную аномалию у восточного побережья Среднего Каспия выходом подземных вод [14, 15]).

Ветровая гипотеза объясняет подъем вод действием ветра – у восточного берега северо-западного, у западного берега – юго-восточного. Возбуждаемые этими ветрами течения отклоняются от берега под действием силы вращения Земли, а непосредственно у берега наблюдается подъем вод. Механизм апвеллинга в Каспийском море с позиции этой теории изложен в [8]. Указанная точка зрения длительное время являлась общепринятой, хотя аргументированные сомнения в ее обоснованности с позиции связи температурных аномалий с внутренними волнами в Среднем Каспии (возникающими на термоклине под действием длинных волн) высказывались в работах [7, 9].

Сторонники волновой гипотезы объясняют появление апвеллинга влиянием континентальных шельфовых волн (волн Россби), которые были доказательно зарегистрированы на Каспии в конце восьмидесятых годов [3]. При этом в качестве источника возбуждения этих волн называется атмосферная активность, флуктуации атмосферного давления и/или ветра

над морем [4, 2]. Указанные волны вызывают циркуляцию воды как в горизонтальной, так и вертикальной плоскости, которая создает подъем и опускание вод [1]. Необходимо отметить, что ветровая и волновая гипотеза не исключают друг друга, а отражают разные аспекты одного явления.

В течение длительного времени основными исходными материалами для изучения апвеллинга были данные прибрежных наблюдений, вследствие чего он трактовался как локальное явление, не играющее особой роли в жизни Каспийского моря. Наличие спутниковых данных позволяет по-новому взглянуть на эту проблему. Тем не менее, следует констатировать, что в гидрологическом отношении апвеллинг изучен недостаточно, а его влияние на гидрохимический и гидробиологический режим вообще остается невыясненным. При этом подъему глубинных вод у западного берега Среднего Каспия (большая часть которого представляет собой Дагестанское побережье) посвящено наименьшее количество публикаций.

Целью наших исследований, обсуждению результатов которых посвящена настоящая статья, является изучение подъема глубинных вод и его роли в формировании гидрохимического и гидробиологического режима западной части Среднего Каспия. Указанные исследования проводятся в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (Государственный контракт №16.740.11.0233).

Для достижения поставленной цели использовались спутниковые снимки акватории Среднего Каспия, материалы прибрежных гидрометеорологических наблюдений на станциях Росгидромета, а также результаты собственных измерений гидрохимических параметров прибрежных вод в районе г. Махачкала в летний сезон, в т.ч. во время подъема глубинных вод (карта-схема района исследований изображена на рис. 1). Интеграция данных осуществлялась при помощи геоинформационных технологий. Такая комбинация контактных и дистанционных методов изучения апвеллин-

га представляется нам наиболее эффективной и научно обоснованной, тем более, что ранее комплексный подход к оценке апвеллинга у Дагестанского побережья Каспийского моря не применялся.



Рисунок 1. Карта-схема района исследований

На первом этапе была разработана классификация случаев апвеллинга в теплый сезон у Дагестанского побережья Каспия по продолжительности, интенсивности и масштабу [11, 10]. Она была использована для обработки данных прибрежных наблюдений за температурой вод, проводимых с мая по сентябрь Дагестанским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ДЦГМС) в период 1995-2009 гг. Установлено, что продолжительность апвеллинга у Дагестанского побережья в 66% случаев не превышает 6 суток. Однако частота этого явления (в среднем 10 случаев за летний сезон), его масштаб (чаще всего субрегиональный), а также ин-

тенсивность (средняя и сильная в 68% случаев) указывает на то, что апвеллинг должен играть существенную роль в функционировании прибрежных морских экосистем.

Ниже приводятся результаты второго этапа работ, в ходе которого осуществлялась апробация комплексного подхода к оценке случаев апвеллинга у Дагестанского побережья Каспийского моря, наблюдавшихся с 1 мая по 30 сентября 2011 г.

Материалами исследований, полученными с помощью контактных методов, выступили данные прибрежных наблюдений за уровнем моря, температурой и соленостью воды на Дагестанском побережье Среднего Каспия, хранящихся в Едином государственном фонде данных о состоянии окружающей среды. На их основе была составлена база данных, включающая среднесуточные значения температуры и солености в поверхностном слое воды на станциях Махачкала, Избербаш и Дербент, а также сведения об уровне моря на станциях Махачкала и Тюлений за исследуемый период (см. рис. 1). Эти материалы были дополнены значениями гидрохимических параметров (рН, содержание растворенного кислорода и биогенных элементов), измеренными в ходе специальных наблюдений за прибрежными водами в районе г. Махачкала (в рабочие дни недели).

Материалы исследований, полученные с применением дистанционных методов, включали ежедневные карты пространственного распределения температурных полей, концентрации хлорофилла «а» и взвеси в поверхностном слое вод Среднего Каспия за исследуемый период. Указанные карты представляют собой результат поэтапной обработки изображений (первого и второго уровней), полученных с помощью спутников Terra и Aqua (MODIS) в промежутке с 10.30 до 14.00 (MSK).

Для создания тематических слоев по температурным полям использовались снимки в инфракрасном диапазоне, имеющие разрешение в 1 км и 0,3-0,5 °С, обработанные с помощью специализированных алгоритмов. Те-

матические слои концентрации хлорофилла «а» создавались аналогичным образом, с шагом  $10 \text{ мг/м}^3$  в шкале логарифмического типа. Для выявления характера распределения взвеси применялись данные второго уровня обработки - коэффициент диффузного ослабления для длины волны 490 нм ( $Kd_{490}$ ), характеризующий степень прозрачности морской воды. После визуализации и извлечения данных, изображения были перепроецированы для экспорта и анализа в ГИС-пакет ArcGis, в котором осуществлялась их дальнейшая обработка. Всего в геореляционную базу данных внесено 95 карт полей температуры, по 79 карт распределения концентрации хлорофилла «а» и взвеси в поверхностном слое воды.

В качестве материалов исследований также были использованы картографические данные о полях ветра над морем накануне и в период подъема глубинных вод, взятые с российского гидрометеорологического портала (информационная система Cliware, раздел «фактическая погода») за 03.00 и 15.00 (MSK) [13].

При обработке материалов прибрежных и спутниковых наблюдений апвеллингом считалось снижение среднесуточной температуры воды за сутки более, чем на  $2^\circ\text{C}$ . За день прекращения апвеллинга принимался день, когда среднесуточная температура воды превысит  $X$ , при этом  $X = T - 1$ , где  $T$  - температура воды в последний день, предшествовавший апвеллингу. В дальнейшем точная продолжительность апвеллинга идентифицировалась по комплексу признаков (температура, соленость, гидрохимические особенности).

Выявленные таким образом случаи апвеллинга классифицировались по продолжительности, интенсивности и масштабу. В частности, по продолжительности апвеллинг подразделялся на короткий (3 и менее суток), нормальный (от 4 до 6 суток) и длительный (7 и более суток).

Для оценки интенсивности апвеллинга использована разность между температурой воды в последние сутки до его наступления и минимальной

температурой, зафиксированной во время апвеллинга. При разности менее 3°C апвеллинг идентифицировался как слабый, от 3 до 5°C - средний, более 5°C - сильный.

По масштабу апвеллинг считался локальным (обнаруживался только в одном из пунктов), субрегиональным - одновременно наблюдался в 2-х пунктах и региональным - одновременно наблюдался в 3-х пунктах [11].

Все случаи апвеллинга были подвергнуты сравнительному анализу с привлечением всего имеющегося массива данных по каждому из них. Результаты его обобщены ниже.

Всего летом 2011 года у Дагестанского побережья подъем глубинных вод по данным стационарных пунктов наблюдений Росгидромета наблюдался 5 раз. Несмотря на то, что данная частота почти в два раза меньше средней за летний сезон, 4 случая апвеллинга оказались длительными, со средней и выше интенсивностью. Причем 3 из них пришлись на район Махачкалы. Считаем необходимым остановиться на них подробнее.

В районе Махачкалы выход холодных вод наблюдался большую часть июня и в третьей декаде августа, при этом в июне отмечено два случая апвеллинга, следующих один за другим. Как видно из рис. 2а, подъем глубинных вод в рассматриваемом районе начался 9 июня и сопровождался падением среднесуточной температуры за первые сутки на 3,6 °С, а также скачкообразным ростом солености сразу на 2 ‰. Согласно спутниковым данным, площадь температурной аномалии 9 июня составила 268 км<sup>2</sup>.

За время первого июньского апвеллинга (9-17 июня) минимальная температура воды составила 13,9 °С. Указанная температура была достигнута 10 июня, а максимальное значение солености – на следующий день (12 ‰) (рис. 2а). Наибольшую площадь апвеллинг занимал 12 июня (301 км<sup>2</sup>), среднее за весь период значение площади температурной аномалии - 211 км<sup>2</sup>.

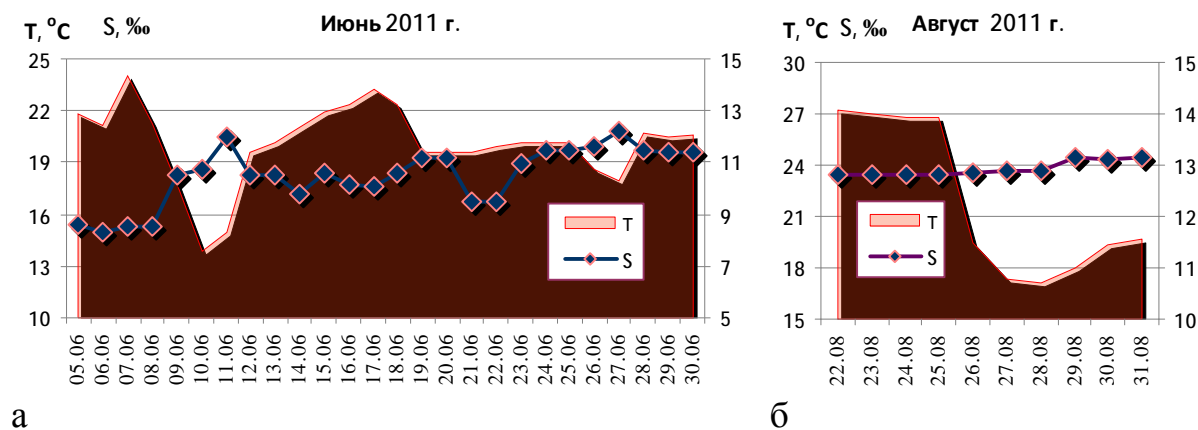


Рисунок 2. Гидрологические условия (температура, соленость) в период подъема глубинных вод на ст. Махачкала летом 2011 г.

(а - среднесуточные значения температуры (Т, °С) и солености (S, ‰) поверхностного слоя воды в июне 2011 г., б – в третьей декаде августа).

По данным наблюдений Росгидромета

Анализ карт распределения температурных полей, построенных по спутниковым материалам, показал, что на акватории, расположенной севернее Махачкалы (район Лопатин), также наблюдался подъем глубинных вод. Он начался раньше на три дня и к 9 июня уже охватывал значительную площадь (1500 км<sup>2</sup>), в это же день была достигнута наименьшая температура поверхностных вод (14,0 °С). Апвеллинг в районе Лопатин отмечался вплоть до 16 июня. Согласно разработанной нами классификации, в обоих случаях его следует охарактеризовать как длительный и сильный.

12 июня короткий и слабый апвеллинг также был зафиксирован в районе Дербента. Площадь его составила около 400 км<sup>2</sup>, с минимумом температуры в 18,5 °С. Приведенные факты позволяют считать, что первый июньский апвеллинг носил региональный масштаб.

Анализ имеющихся по рассматриваемому случаю данных гидрохимических наблюдений показал, что в период подъема глубинных вод происходило заметное изменение гидрохимических показателей. В частности, во время апвеллинга происходило постепенное увеличение содержания рас-



творенного кислорода и величины рН в поверхностном слое воды. Наибольшие значения обоих показателей, измеренных в утренние часы, отмечены в день окончания апвеллинга – 17 июня (9,70 мг/л и 8,64 соответственно). Средняя концентрация растворенного кислорода за период апвеллинга в утреннее время (9.00) составила 8,95 мг/л, дневное (15.00) – 9,41 мг/л.

Известно, что косвенным признаком интенсивности происходящих в воде продукционных процессов является динамика концентрации растворенного кислорода и водородного показателя за световой день. К примеру, положительное значение приращений содержания кислорода в воде и значений рН в течение дня свидетельствует о преобладании продукции над деструкцией, а наличие положительного тренда изменчивости этих значений – об интенсификации продукционных процессов.

С целью выяснения воздействия апвеллинга на продукцию нами были рассчитаны приращения указанных величин ( $\Delta O_2$ , мг/л,  $\Delta pH$ ) с 9.00 до 15.00 (рис. 3а, в). Полученные результаты указывают на то, что с наступлением апвеллинга продукционные процессы в поверхностном слое воды заметно усилились, а к его концу резко ослабли. Из-за наличия пропусков в данных, можно только предполагать, что пик продукции пришелся на день достижения наибольшей площади температурной аномалии.

Следует отметить, что значимый прирост содержания кислорода и величины рН отмечался еще с 6 июня, что можно объяснить влиянием макромасштабного апвеллинга в районе Лопатин или наличием иных мощных источников поступления биогенов в морскую воду. Учитывая факт нахождения пункта наблюдений на территории Махачкалинского порта, нельзя также исключать антропогенные источники. Данные о содержании биогенных элементов в целом согласуются с этими предположениями.

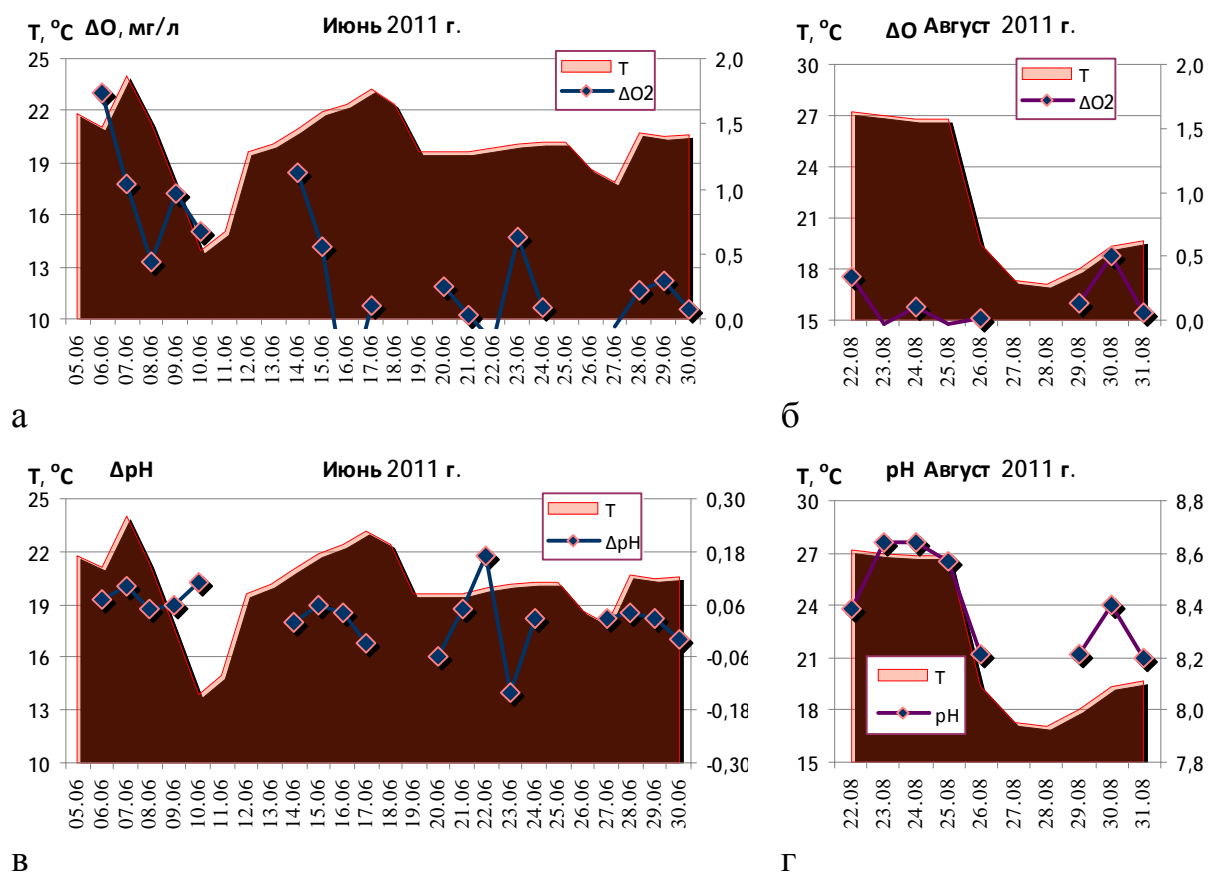


Рисунок 3. Показатели суточной изменчивости содержания растворенного кислорода и величины рН на ст. Махачкала летом 2011 г.

по результатам измерений в 9.00 и 15.00 в поверхностном слое воды (а - приращение содержания растворенного кислорода ( $\Delta O_2$ , мг/л) в июне, б - в третьей декаде августа; в - приращение величины рН ( $\Delta pH$ ) в июне, г - в третьей декаде августа)

На рис. 4а, в, д отображена изменчивость содержания биогенных элементов (фосфатов, кремния, аммонийного азота, мкг/л) в поверхностном слое воды в июне 2011 г. Изменения гидрохимического режима заметны с первых дней наступления апвеллинга. Вслед за понижением температуры воды отмечался заметный рост концентрации фосфатов и аммонийного азота, тогда как содержание кремния проявило некоторую инертность. При этом максимальные концентрации фосфатов и аммонийного азота за время

подъема глубинных вод наблюдались уже во второй день - 10 июня (14,7 и 190 мкг/л соответственно), а кремния - 14 июня (399 мкг/л).

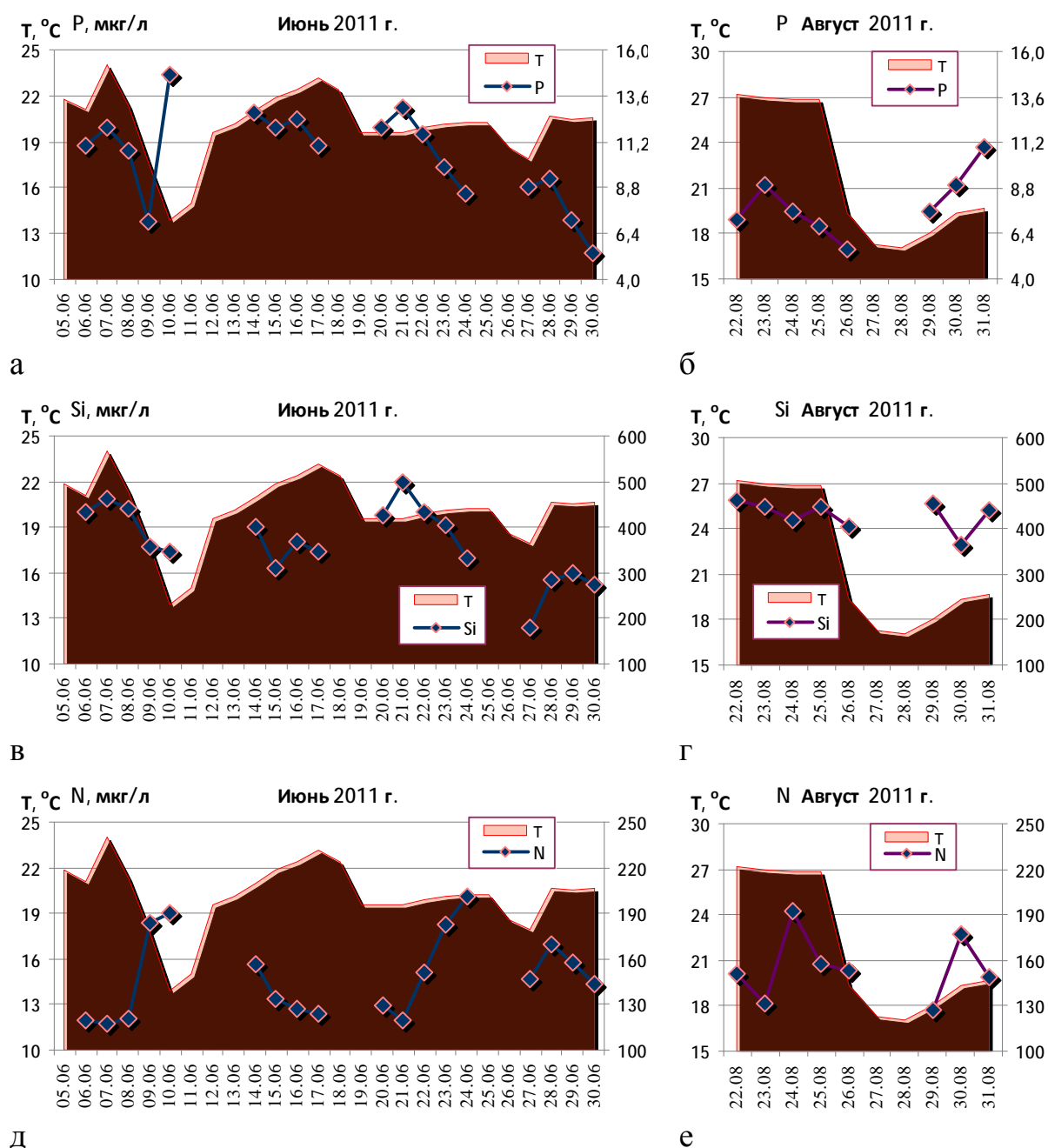


Рисунок 4. Содержание биогенных элементов в поверхностном слое

воды в период апвеллинга на станции Махачкала летом 2011 г.

по результатам измерений в 9.00 (а – концентрация фосфатов (P, мкг/л) в

июне, б - в третьей декаде августа; в - содержание кремния (Si, мкг/л) в

июне, г - в третьей декаде августа; д – концентрация аммонийного

азота (N, мкг/л) в июне, е - в третьей декаде августа)

Привлечение спутниковых данных для выяснения гидробиологических условий с 9 по 17 июня показало, что сразу после снижения температуры наблюдался всплеск функциональной активности фитопланктона, который выражался в резком повышении концентрации хлорофилла «а» в районе Махачкалы с  $6 \text{ мг/м}^3$  (8-9 июня) до  $17 \text{ мг/м}^3$  (10 июня) (рис. 5). Высокое содержание хлорофилла «а» наблюдалось также 11 июня ( $9,9 \text{ мг/м}^3$ ). В остальные дни первого июньского апвеллинга значения концентрации хлорофилла «а» колебались в пределах  $4,3\text{-}4,6 \text{ мг/м}^3$ .

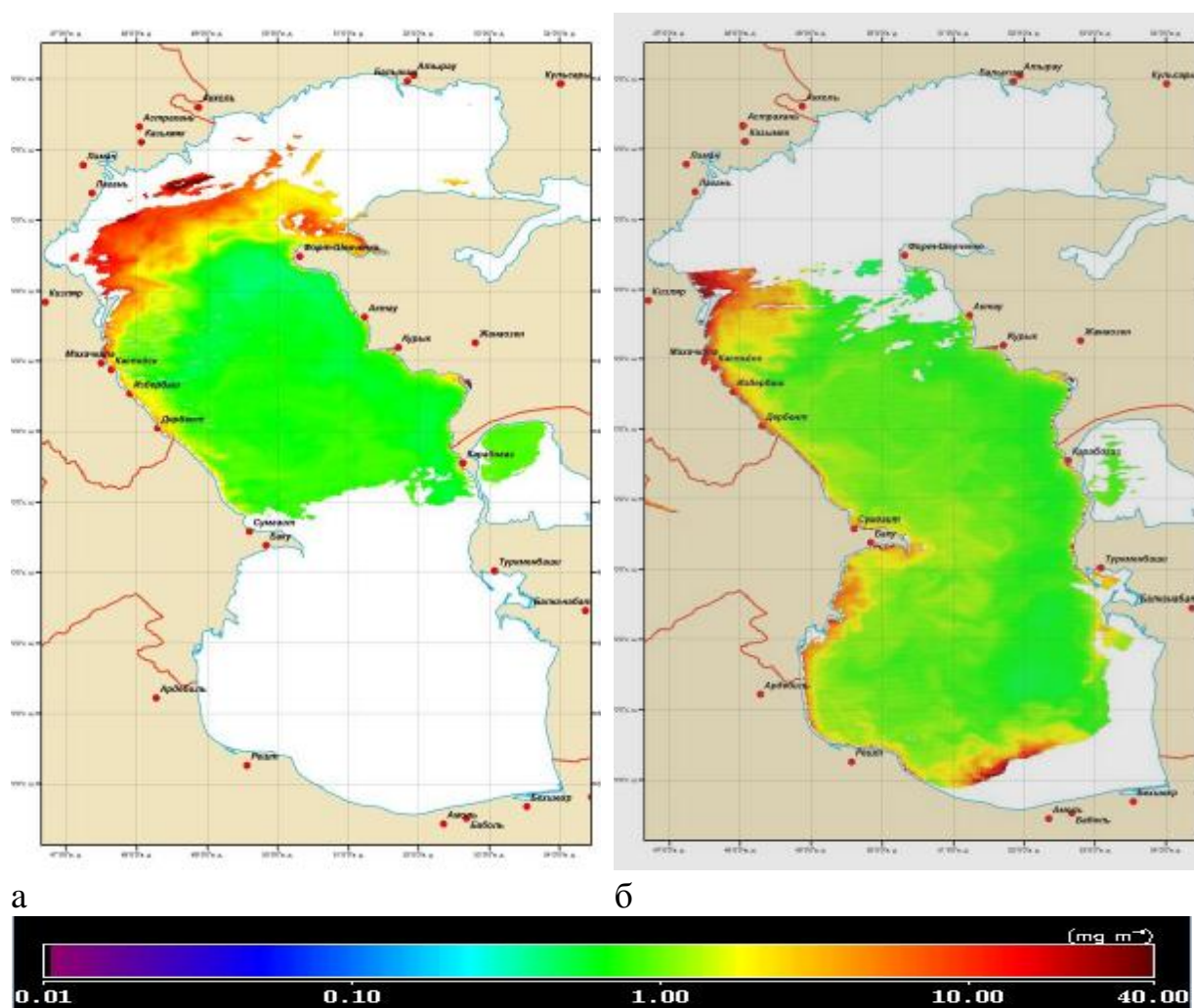


Рисунок 5. Карты пространственного распределения концентрации хлорофилла «а» ( $\text{мг/м}^3$ ) в поверхностном слое воды Каспийского моря в июне 2011 г. (а - 8 июня, б - 10 июня)

Накануне апвеллинга (8 июня) на акватории, расположенной южнее Лопатина (вплоть до Махачкалы), область с концентрацией хлорофилла «а» более  $5 \text{ мг/м}^3$  занимала  $1011 \text{ км}^2$ , а концентрацией в  $10\text{-}14 \text{ мг/м}^3$  -  $357 \text{ км}^2$ . При этом площадь взмученных вод (с коэффициентом диффузного ослабления ( $K_d$ ) более  $0,1 \text{ м}^{-1}$ ) составляла около  $10\,690 \text{ км}^2$ . К 10 июня участки акватории, с содержанием хлорофилла «а» более  $5 \text{ мг/м}^3$  охватывали  $1554 \text{ км}^2$ , более  $10 \text{ мг/м}^3$  –  $1646 \text{ км}^2$ , а от  $15$  до  $20 \text{ мг/м}^3$  – около  $300 \text{ км}^2$ ; площадь взмученных вод с  $K_d > 0,1 \text{ м}^{-1}$  увеличилась до  $14\,850 \text{ км}^2$ , а вдоль берега узкой полосой с севера на юг протянулась струя с высокими показателями мутности ( $K_d$  до  $4 \text{ м}^{-1}$ ), площадью  $2\,095 \text{ км}^2$  (рис. 6).

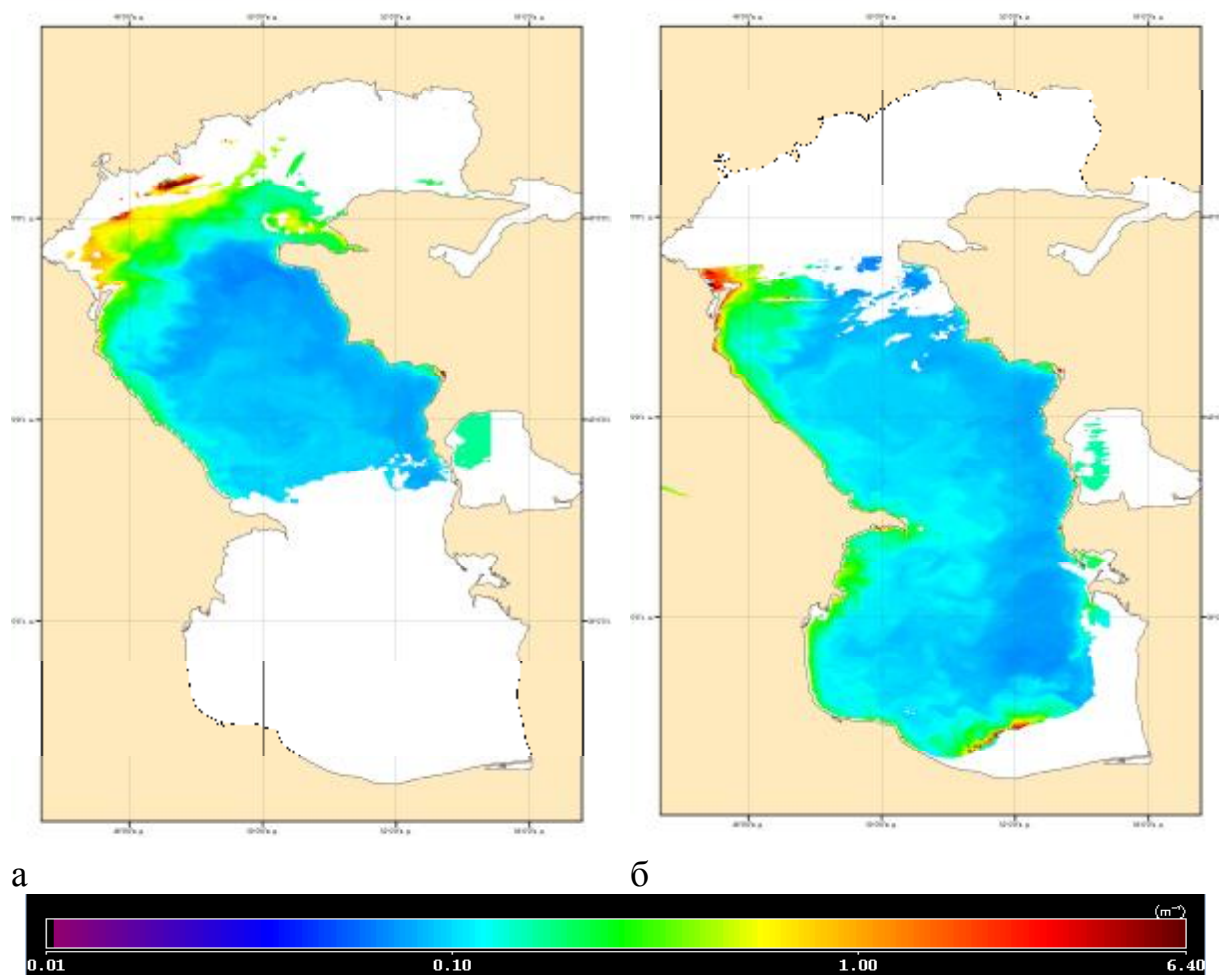


Рисунок 6. Карты пространственного распределения концентрации взвеси ( $K_d_{490}$ ,  $\text{м}^{-1}$ ) в поверхностном слое воды Каспийского моря в июне 2011 г.

(а - 8 июня, б - 10 июня)

Второй июньский апвеллинг в районе Махачкалы наблюдался с 19 июня по 1 июля (см. рис. 2а). От предыдущего случая его отличает большая продолжительность, но меньшая интенсивность (средняя). Минимальная среднесуточная температура за его время составила 17,9 °С. На рис. 2а хорошо видно, что подъем глубинных вод уже в первые сутки сопровождался падением среднесуточной температуры поверхностных вод на 2,8 °С, а также ростом солености почти на 1 ‰. Средняя площадь температурной аномалии составила 253 км<sup>2</sup>, наибольшая площадь - 454 км<sup>2</sup> (зафиксирована 26 июня, в этот же день наблюдалась и наивысшая соленость – 11,62‰).

Согласно спутниковым данным, подъем холодных вод в районе Махачкалы происходил синхронно с таковым в районе Лопатин. Следует особо отметить макромасштабный характер последнего (средняя величина площади за весь период - 1131 км<sup>2</sup>). При этом максимальная площадь охвата апвеллингом акватории района Лопатин составила 2079 км<sup>2</sup> и наблюдалась 26 июня. Таким образом, второй июньский апвеллинг может быть отнесен к субрегиональному.

Согласно материалам прибрежных наблюдений, во время подъема глубинных вод также наблюдалось изменение гидрохимических условий. В частности, этот случай апвеллинга сопровождался существенными колебаниями содержания растворенного кислорода и величины рН в поверхностном слое воды. Средняя концентрация растворенного кислорода за период апвеллинга в утренние часы (9.00) составила 8,82 мг/л, максимальная – 9,80 мг/л. В дневное время (15.00) среднее значение содержания кислорода в воде составляло 8,96 мг/л, максимальное – 10,05 мг/л. Наибольшие концентрации кислорода в воде были зафиксированы на следующий день после наступления апвеллинга (20 июня).

Анализ динамики величин приращения концентрации растворенного кислорода и водородного показателя с 9.00 до 15.00 во время подъема глу-

бинных вод показал, что она носила сложный характер (см. рис. 3а, в). Сначала продукционные процессы несколько активизировались в первые несколько дней после начала апвеллинга, но уже с гораздо меньшей, чем в предыдущий случай, интенсивностью. Затем наблюдалось скачкообразное снижение продукции, сменившееся на период 26-29 июня ее повышением. После чего продукция вновь снижалась.

Сходный характер динамики отмечен и в отношении биогенных элементов (рис. 4а, в, д). Подъем глубинных вод вначале ознаменовался заметным ростом концентраций фосфатов, кремния и аммонийного азота, вслед за которым наблюдалось довольно резкое их снижение. Рост значительных концентраций происходил уже после 26 июня. К окончанию апвеллинга содержание биогенов вновь опустилось. За время подъема глубинных вод максимальная концентрация фосфатов составила 13,0 мкг/л, кремния - 500 мкг/л (наблюдались 21 июня), аммонийного азота - 183 мкг/л (23 июня).

Анализ спутниковых данных с целью выявления гидробиологических особенностей второго июньского апвеллинга показал, что апвеллинг инициировал скачкообразные изменения функциональной активности фитопланктона. Концентрация хлорофилла «а» с 20 по 23 июня в районе Махачкалы менялась в диапазоне 8-12 мг/м<sup>3</sup>, тогда как накануне апвеллинга она составляла около 4 мг/м<sup>3</sup>. Высокое содержание хлорофилла «а» наблюдалось 24 июня (около 23 мг/м<sup>3</sup>) (рис. 7). В остальные дни значения концентрации хлорофилла «а» находились в пределах 6,1-9,4 мг/м<sup>3</sup>.

В целом на акватории, охваченной апвеллингом, 21 июня концентрация хлорофилла «а» в диапазоне 2-5 мг/м<sup>3</sup> отмечена на площади в 928 км<sup>2</sup>, повышенное содержание взвеси ( $K_d > 0,1 \text{ м}^{-1}$ ) установлено на участке в 1153 км<sup>2</sup>.

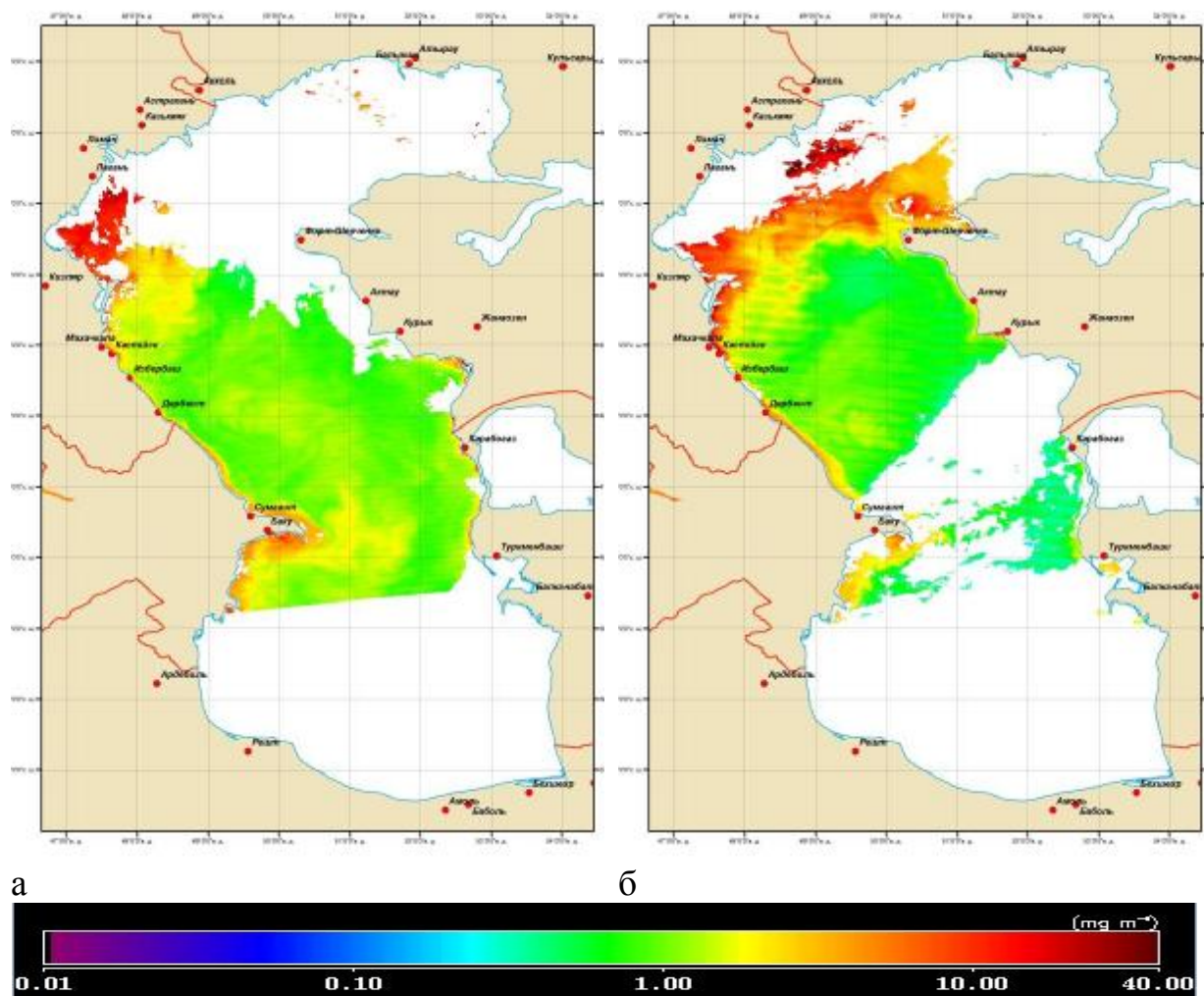


Рисунок 7. Карты пространственного распределения концентрации хлорофилла «а» ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) в поверхностном слое воды Каспийского моря в июне 2011 г. (а - 21 июня, б - 24 июня)

24 июня содержание хлорофилла «а» выше  $5 \text{ mg}/\text{m}^3$  зафиксировано на площади в  $1819 \text{ km}^2$ , а в пределах  $9\text{-}14 \text{ mg}/\text{m}^3$  - на  $810 \text{ km}^2$ . На долю вод с повышенной концентрацией взвешенных частиц ( $K_d > 0,1 \text{ m}^{-1}$ ) приходилось  $7963 \text{ km}^2$ , высокой ( $K_d > 1 \text{ m}^{-1}$ ) -  $1550 \text{ km}^2$  (рис. 8).



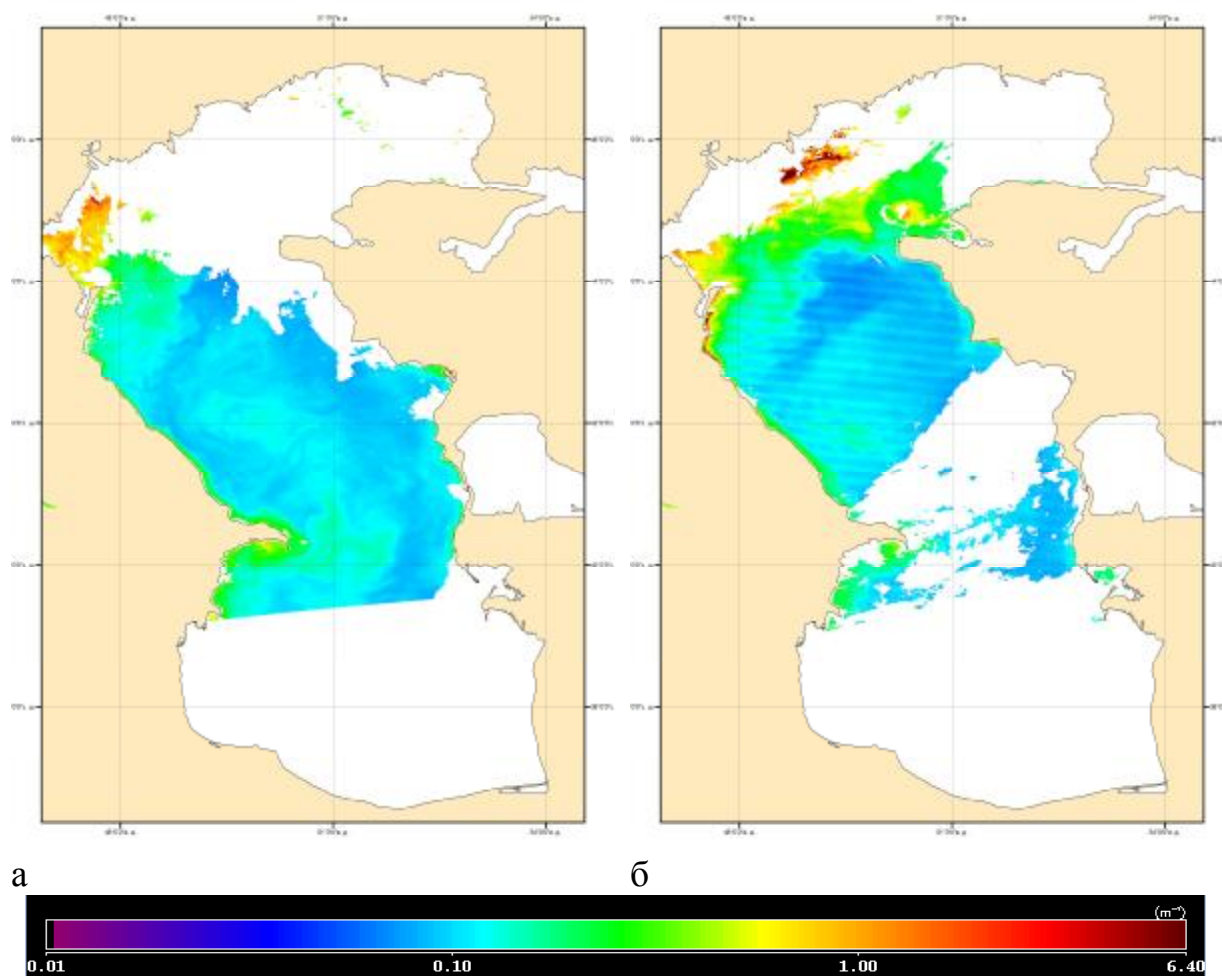


Рисунок 8. Карты пространственного распределения концентрации взвеси ( $Kd_{490}$ ,  $\text{mg}^{-1}$ ) в поверхностном слое воды Каспийского моря в июне 2011 г. (а - 21 июня, б - 24 июня)

На Дагестанском побережье следующий случай апвеллинга наблюдался в третьей декаде августа. Как видно на рис. 2б, подъем глубинных вод, начавшийся в районе Махачкалы 26 августа и завершившийся 1 сентября, сопровождался снижением среднесуточной температуры сразу на  $7,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Стоит отметить, что данный случай апвеллинга начался на фоне незначительного роста солености, а за весь его период диапазон ее изменения составил всего  $0,32\%$ .

За время апвеллинга минимальная температура воды у берега составила  $17,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что позволяет отнести его к сильному, а учитывая продолжи-

тельность – к длительному. Указанная температура была достигнута 28 августа, а максимальное значение солености – 31 августа (13,16 ‰) (см. рис. 2б), тогда же температурная аномалия и занимала наибольшую площадь (963 км<sup>2</sup>). Средняя площадь акватории, охваченной апвеллингом, составила около 520 км<sup>2</sup>.

Подъем глубинных вод в районе Махачкалы носил субрегиональный масштаб, так как одновременно с ним наблюдался апвеллинг в районе Лопатин, который начался 22 августа. Он охватывал значительную площадь (среднее значение – 1774 км<sup>2</sup>, максимальное (31 августа) - 4092 км<sup>2</sup>).

Анализ имеющихся гидрохимических данных показал, что в период подъема глубинных вод также происходило изменение гидрохимической структуры вод. При этом апвеллингу предшествовал рост содержания растворенного кислорода и величины рН в поверхностном слое воды. Наибольшие значения концентрации кислорода в морской воде, измеренные в утренние и дневные часы, отмечены 26 августа (около 8 мг/л). Средняя концентрация растворенного кислорода за период апвеллинга в утреннее время (9.00) составила 7,62 мг/л, дневное (15.00) – 7,79 мг/л.

Несмотря на отсутствие данных, относящихся к первым дням апвеллинга на графике изменчивости величин  $\Delta O_2$  и  $\Delta pH$ , приведенном на рис. 3б, г, следует отметить, что характер продукционных процессов в период подъема глубинных вод изменился, скорее всего, они плавно усиливались, о чем свидетельствует их пик после 29 августа. В целом они не отличались высокой интенсивностью. Данная картина хорошо согласуется с содержанием биогенов в поверхностном слое воды.

Из рис. 4б, г, е видно, что понижению температуры воды предшествовал рост содержания фосфатов и аммонийного азота, между тем как содержание кремния изменялось слабо. Затем концентрации биогенов синхронно снижались, вновь увеличиваясь на исходе апвеллинга. За время подъема глубинных вод максимальная концентрация фосфатов составила

11,0 мкг/л (31 августа), кремния - 456 мкг/л (29 августа), аммонийного азота - 153 мкг/л (26 августа).

Использование спутниковых данных с целью установления конкретных гидробиологических условий у Дагестанского побережья в третью декаду августа 2011 г. оказалось затрудненным ввиду наличия облачности. Удалось установить, что концентрация хлорофилла «а» в прибрежной полосе у Махачкалы накануне апвеллинга (24 августа) составляла от 3 до 6 мг/м<sup>3</sup>, а по данным за 29 августа – от 9 до 15 мг/м<sup>3</sup>.

В районе подъема глубинных вод на Дагестанском побережье 24 августа акватория с концентрацией хлорофилла свыше 5 мг/м<sup>3</sup> охватывала 688 км<sup>2</sup>, а непосредственно в районе Лопатина концентрации в 20-23 мг/м<sup>3</sup> наблюдались на 145 км<sup>2</sup>. 29 августа содержание хлорофилла «а» более 5 мг/м<sup>3</sup> отмечено на площади 3528 км<sup>2</sup>, а свыше 10 мг/м<sup>3</sup> – на 847 км<sup>2</sup>. Взмученными водами ( $K_d > 0,1$ ) было занято 12 890 км<sup>2</sup>, а наивысшая концентрация взвешенных частиц ( $K_d > 1$ ) наблюдалась на участке в 2200 км<sup>2</sup>.

С целью установления природы апвеллинга в районе Махачкалы летом 2011 г. нами был использован уже упомянутый массив данных о полях ветра над морем. Он был проанализирован с точки зрения наличия устойчивых юго-восточных ветров накануне и во время апвеллинга, так как именно они, согласно ветровой гипотезе, должны вызывать подъем глубинных вод у Дагестанского побережья.

Оказалось, что накануне первого июньского апвеллинга (с 6 по 8 июня) действительно преобладали ветры юго-восточных направлений, однако их скорость составляла всего 3-4 м/с. В день же наступления апвеллинга (9 июня) ветер поменял направление на юго-западное (2 м/с). В дни, предшествующие второму июньскому подъему вод (16-18 июня), а также в день его начала установился относительно устойчивый юго-восточный ветер, но с той же небольшой скоростью (3-4 м/с).

Что касается случая апвеллинга, наблюдавшегося в третьей декаде августа, то накануне его преобладали ветра сначала западных, северо-западных, а потом и восточных направлений. В день, когда был зафиксирован апвеллинг (26 августа), юго-восточный ветер начал дуть только после 15.00, а 27 августа уже и вовсе поменял свое направление.

Таким образом, объяснить все случаи апвеллинга у Дагестанского побережья летом 2011 г. при помощи дрейфовой гипотезы не удастся, тем более, что наблюдавшиеся скорости юго-восточного ветра, на наш взгляд, слишком малы.

Судя по данным наблюдений за уровнем моря (см) и температурой воды в период в летний сезон 2011 г. на ст. Махачкала и Тюлений, наблюдавшийся в это время апвеллинг носил волновой характер. Как следует из графика, изображенного на рис. 9, в июне и третьей декаде августа колебания температуры воды и уровня моря происходили циклически, с периодичностью 6-8 суток, что соответствует нижней границе периода внутренних волн (волн Россби). Подобная цикличность наблюдалась также в отношении гидрохимических параметров.

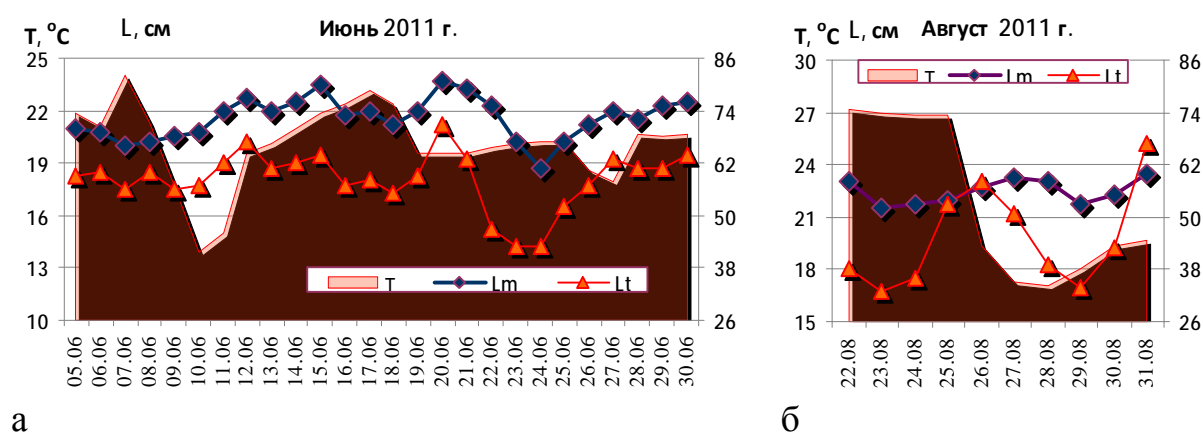


Рисунок 9. Уровень моря (L, см) на станциях Махачкала и Тюлений в период подъема глубинных вод летом 2011 г.

(а - июнь, б - третья декада августа).

По данным наблюдений Росгидромета

Итак, применение подхода, заключающегося в использовании комбинации контактных и дистанционных методов анализа случаев апвеллинга у Дагестанского побережья Каспийского моря, позволило получить наиболее полные сведения о пространственно-временной изменчивости его характеристик летом 2011 года.

Использование большого массива спутниковых материалов за исследуемый период подтвердило, что апвеллинг у Дагестанского побережья Среднего Каспия является мезо- и даже чаще макромасштабным явлением. Например, региональный апвеллинг во второй декаде июня 2011 г. наблюдался на площади в 2200 км<sup>2</sup>. Особенно крупные температурные аномалии отмечаются, как правило, в районе Лопатина (на границе с Северным Каспием) – свыше 4 тыс. км<sup>2</sup>.

Считаем, что продолжительность апвеллинга наиболее четко может быть идентифицирована только по комплексу признаков (температура, соленость, гидрохимические показатели). Предложенный нами критерий выявления случаев апвеллинга по снижению среднесуточной температуры воды за сутки более, чем на 2°С уже хорошо себя зарекомендовал, а значения солености вообще оказались хорошим маркером наступления и окончания подъема глубинных вод. Однако использование в настоящем исследовании гидрохимических показателей для оценки апвеллинга, в особенности длительного и сильного, позволило выявить косвенные признаки того, что апвеллингу у Дагестанского побережья предшествует подъем глубинных вод в подповерхностный слой.

Нами установлено, что апвеллинг у Дагестанского побережья Каспийского моря инициирует скачкообразные изменения функциональной активности фитопланктона, что выражается в росте концентрации хлорофилла «а» и взвеси в прибрежной зоне в первые несколько дней апвеллинга. В период июньского апвеллинга концентрации хлорофилла «а» в поверх-

ностном слое достигали больших значений, чем во время подъема глубинных вод в третьей декаде августа.

В целом комплексный анализ случаев апвеллинга в районе Махачкала показал, что наибольшее влияние на функционирование морских экосистем, по-видимому, оказывает апвеллинг, особенно продолжительный, происходящий в начале летнего сезона. После прохождения «циклов» апвеллинга глубинные водные массы эволюционируют, при этом трансформируются их гидрологические и гидрохимические показатели.

### Литература

1. Бондареко, А.Л. Крупномасштабные течения и долгопериодные волны Мирового океана [Электронный ресурс] / А.Л. Бондаренко. - Издание 2-е, дополненное, 2011. - 163 с. – Режим доступа: <http://www.randewy.ru/gml/monogr.html>, свободный. – Загл. с экрана.
2. Бондареко, А.Л. Течения в Каспийском море, обусловленные свободными низкочастотными волнами / А.Л. Бондареко, Ю.Г. Филлипов // Метеорология и гидрология. - 2004. - №8. - С. 73-77.
3. Бондаренко, А.Л. Течения Каспийского моря и формирование поля солёности вод Северного Каспия / А.Л. Бондаренко. - М.: Наука, 1993. – 122 с.
4. Власенко, В.И. Генерация квазиинерционных колебаний при апвеллинге у южного берега Крыма / В.И. Власенко, В.А. Иванов, Н.М. Стащук // Океанология. - 1996. - Т. 36. - № 1. - С. 43-51.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VI. Каспийское море. - СПб: Гидрометеоздат, 1992. - 360 с.
6. Каспийское море. Гидрографическое описание и руководство для плавания издания 1877 года. - СПб., 1908. - С. 237-238.
7. Керимов, А.А. Аномалия температуры воды и внутренние волны в Среднем Каспии / А.А. Керимов, Н.Ц. Клевцова // Тр. ЗакНИИГМИ, 1977. - вып. 70. - С. 53-63.
8. Косарев, А.Н. Гидрология Каспийского и Аральского морей / А.Н. Косарев. - М: Изд-во МГУ, 1975. - С. 174-194.
9. Монахов, С.К. К прогнозу температурных аномалий воды у Дагестанского побережья / С.К. Монахов // Рекреационные ресурсы Каспийского моря. Проблемы использования и охраны. - М: Наука, 1989. - С. 56-58.
10. Монахова, Г.А. Об апвеллинге у западного побережья Среднего Каспия [Электронный ресурс] / Г.А. Монахова // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2011». - М.: МАКС Пресс, 2011. - Режим доступа: [http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov\\_2011/1183/5466\\_c722.pdf](http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2011/1183/5466_c722.pdf), свободный. – Загл. с экрана.
11. Монахова, Г.А. Подъем глубинных вод у западного побережья Среднего Каспия [Электронный ресурс] / Г.А. Монахова, Г.А. Ахмедова // Научный журнал КубГАУ. - 2010. - №63. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/09/pdf/15.pdf>,

- свободный. – Загл. с экрана. - Идентификационный номер ИНФОРМРЕГИСТРа: 0421000012\0255
12. Панин, Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. / Г.Н. Панин. - М.: Наука, 1987. – 88 с.
  13. Российский гидрометеорологический портал [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://cliware.meteo.ru/izomap1/index.jsp?lang=ru>, свободный. - Загл. с экрана.
  14. Уланов, Х.К. Аномалии температуры воды в восточной части Среднего Каспия / Х.К. Уланов // Изв. АН АзССР, сер. геол.-геогр. – 1960. - №4. - С. 57-58.
  15. Уланов, Х.К. Об аномалии температуры воды и подземном питании восточной части Среднего Каспия / Х.К. Уланов // Изв. Всес. геогр. общества. - 1962. - т. 94. - №5. - С. 431-435.