

# Пылевые бури и апвеллинг в Аральском море

**В.Е. Скляр**

*Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН  
117997 Москва, Нахимовский пр-т, 36  
E-mail: [vsklyarov@km.ru](mailto:vsklyarov@km.ru)*

В последние годы мы провели наблюдения за поверхностью Аральского моря, используя видимые и инфракрасные каналы аппаратуры спутников TERRA, AQUA и NOAA. Оказалось, что в весенний период, когда начинается интенсивный прогрев приповерхностного слоя и образуется устойчивая термическая стратификация, наблюдается и апвеллинг в западной части Аральского моря. На приводимых спутниковых изображениях мы можем наблюдать интенсивный апвеллинг в середине мая 2005г. Результаты мультиспектрального анализа показали, что центральная часть западного Арала была занята холодной апвеллинговой водой. Анализ измерений в видимой и ближней ИК области спектра свидетельствовал, что наблюдениям соответствовала ясная погода и чистая (отсутствие аэрозоля) атмосфера. Вместе с тем, измерения в термической ИК области (11 мкм) указывали на наличие существенных контрастов в поле температуры поверхности моря. Аналогичные и не менее яркие проявления апвеллинга были зафиксированы и весной 2008г. Общим в обоих случаях было проявление апвеллинга у восточного берега западной части Арала и его последующее распространение в направлении противоположного берега. С точки зрения автора, особенности подъема вод в Арале во многом специфичны из-за влияния орографии побережья и особенности рельефа дна. Следует отметить, что распространение холодных апвеллинговых вод представляется весьма важной чертой термической структуры и динамики Аральского моря.

**Ключевые слова:** Аральское море, пылевые бури, апвеллинг, исследования из космоса.

## Введение

Измерения из космоса являются уникальным средством наблюдения труднодоступных районов на земном шаре. К таким районам вполне можно отнести Аральское море. Аральское море это кризисный с экологической точки зрения регион и поэтому вызывает большой интерес у исследователей. Море расположено в центре среднеазиатских пустынь. При сильных ветрах над Аральским морем весьма часто возникают пылевые бури. Воздействие пылевых бурь на оптические свойства верхнего слоя вод и его химический состав представляет особый интерес. Однако сильный ветер вызывает и явление подъема глубинных вод – апвеллинг. Этот подъем вод способствует процессам интенсивного обмена и перемешивания в верхнем слое моря. Таким образом, интенсивный ветер играет важную роль в формировании физико-химических свойств и динамики вод Аральского моря.

## Аральское море

Справочные данные по Аральскому морю. Окруженное со всех сторон сушей, Аральское море расположено в зоне пустынь Средней Азии между 46°53' и 43°26' с.ш., 58°12' и 61°58' в.д. и лежит на 48,5 м выше уровня океана. Оно удалено на 4300 км от Атлантического, на 2500 км от Северного ледовитого, на 4500 км от Тихого и на 1800 км от Индийского океанов. Море открыто с запада, севера и востока, а с юга защищено высочайшими горными системами. Особенности географического положения, полная изоляция от Мирового океана делают Арал своеобразным водоемом, который относится к типу «море-озеро» [1]. Арал – бессточный соленый водоем, к 1990 г.

площадь составила 36,5 тыс. кв. км (в том числе так называемое Большое море 33,5 тыс. кв. км); до 1960 г. площадь равнялась 66 тыс. кв. км. Преобладающие глубины 10-15 м, наибольшая - 54,5 м. Имелось свыше 300 островов (наиболее крупные - Барсакельмес и Возрождения).

На рис. 1 изображена карта Аральского региона, составленная в середине 19 века. Нетрудно видеть, каким было море раньше. Однако из-за хозяйственной деятельности человека, особенно в последние десятилетия, ситуация резко изменилась. Уже к 1995 году море потеряло три четверти водного объема, а площадь поверхности сократилась более чем наполовину. В настоящее время обнажилось и подверглось опустыниванию свыше 33 тысяч квадратных километров морского дна. Береговая линия отступила на 100-150 километров. Соленость воды возросла в разы [2]. Много признаков указывает на то, что количество воды в Арал уменьшается, т.е., что осадки (дождь и снег) и реки приносят менее воды, чем ее испаряется. Присутствует множество признаков этого явления: у довольно высоких западных берегов встречаются утесы, с явными следами сильного действия волн, на такой высоте над уровнем воды, которой теперь не достигают волны и в бурю. На низменных южных и восточных берегах большие пространства вышли из под воды и обратились в сушу. Отчасти это следует приписать деятельности рек, но это явление замечается и там, куда не попадают речные осадки.



Рис. 1. Карта региона Аральского моря, составленная в середине 19–го столетия

Уменьшение количества воды в Арале может происходить по следующим причинам: 1) уменьшения стока двух рек, впадающих в Арал – Амударьи и Сыр-Дарьи, 2) уменьшение количества осадков, выпадающих на поверхность озера и его окрестности. 3) более высокой температурой, меньшей влажностью воздуха, и более сильных ветров, т.е. явлений, усиливающих испарение

(<http://kungrad.com/aryl>) . В настоящее время невозможно определить точную причину обмеления Арала. Высыхание озер и уменьшение стока речных вод происходит и на всем пространстве к востоку от Арала до дальнего востока. Кроме природных явлений, деятельность человека (уничтожение лесов и увеличение окультуренных площадей) также могла привести к катастрофическим последствиям. Реки Амударья и Сыр-Дарья, впадающие в Аральское море, ранее являлись основным источником, питающими водоем. Они доставляли в Аральское море 60 кубокилометров воды в год. Сейчас реальное поступление пресной воды не превышает 4 кубокилометров в год.

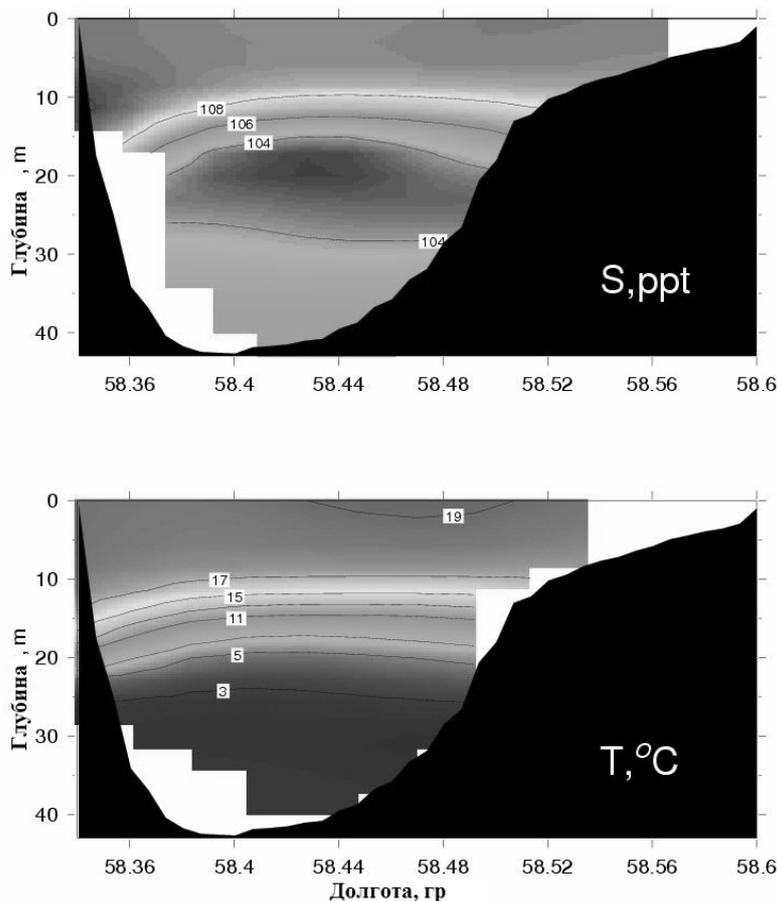


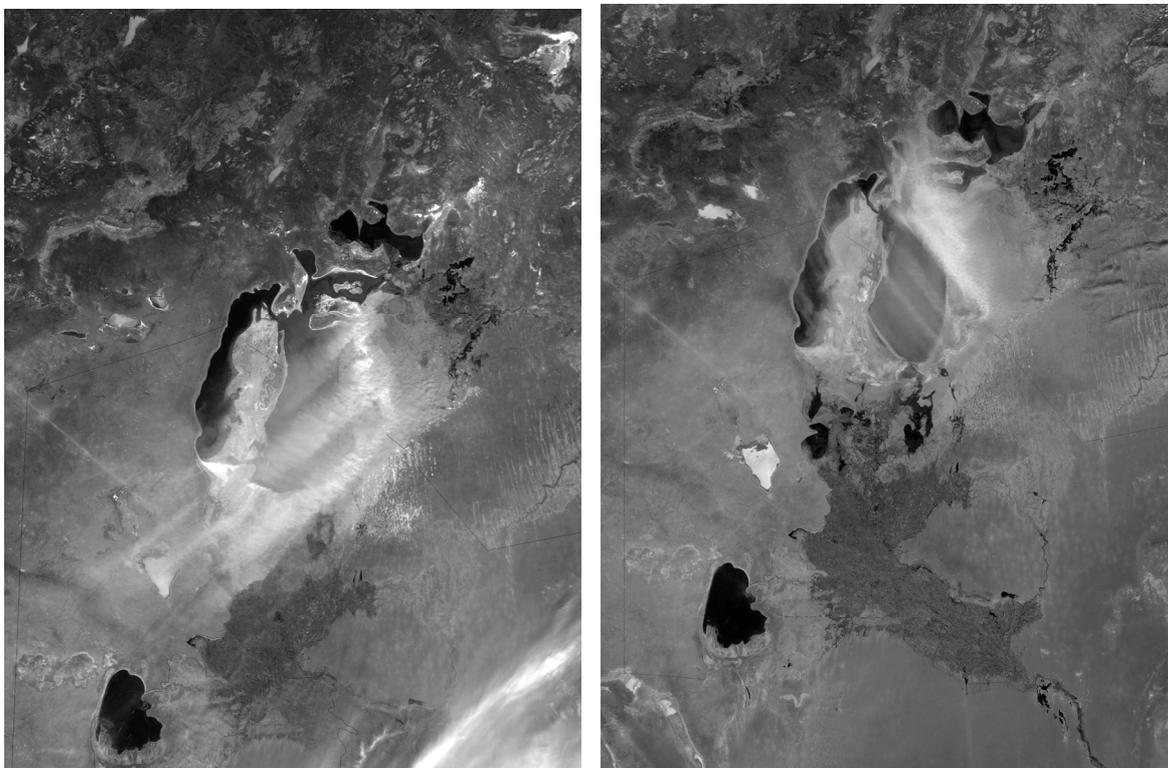
Рис. 2. Вертикальные распределения солёности и температуры (по данным Завьялова П.О. - <http://www.ocean.ru/content/view/71/50/>) в поперечном сечении западного бассейна Аральского моря в сентябре 2006 г.

В Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН в последние годы под руководством д.г.н. П.О. Завьялова проводились экспедиционные работы по исследованию Аральского моря. Обнаружено, что солёность в западном бассейне продолжает повышаться. На поверхности она возросла примерно на 2 г/кг с октября 2005 г по март 2006 г и еще на 9 г/кг с марта по сентябрь 2006 г и составила 109 г/кг. Уровень моря за этот период понизился на 52 см (по данным прямых геодезических измерений). Балансовые оценки указывают на то, что в настоящее время продолжающееся осолонение западного бассейна Арала связано не столько с падением уровня моря, сколько с водообменом между глубоким западным и мелководным, более солёным восточным бассейнами. На рис. 2 (<http://www.ocean.ru/content/view/71/50/>) изображены вертикальные распределения солёности и температуры в поперечном сечении западного бассейна Аральского моря в сентябре 2006 г. Наиболее полные и обобщенные сведения о современном состоянии Аральского моря можно найти в монографии П.О. Завьялова [3].

## Пылевые бури

Пылевые бури представляют собой глобальное явление, происходящее регулярно и, при этом, атмосферными потоками переносится значительное количество песка и пыли (более 2000 млн. по данным [4]) из пустынь Гоби, Сахары, Намибии, Аравийского п-ова и др. Пыль из Сахары за 5-7 дней достигает Карибского моря и юго-восточных районов США (USGS Open File Rreport 03-028, [http://castel.er.usgs.gov/african\\_dust/](http://castel.er.usgs.gov/african_dust/)), а следы азиатской пылевой бури, пересекающей Тихий океан, обнаруживались даже у Великих озер (PLANKTOS Ocean Science 2005, <http://www.planktos.com/>).

Для целей наших исследований представляется особенно значимым воздействие выпадающих из атмосферы песка и пыли на оптические свойства верхнего слоя океана. Отметим, что этот вопрос слабо освещен в научной литературе. В литературных источниках, имеются лишь отдельные свидетельства (например, [5]) о том, что обратное рассеяние в зеленой области спектра в верхнем слое океана значительно увеличивается после прохождения пылевой бури. Это происходит за счет насыщения верхнего слоя терригенными частичками взвеси, которые хорошо рассеивают солнечный свет. С другой стороны, эти частички, являясь пассивной примесью, легко вовлекаются отдельными струями течений в локальную циркуляцию. Эти факторы создают реальную основу для наблюдений из космоса за деталями мезо-масштабной циркуляции.



*Рис. 3. Пылевые бури над Аральским морем при восточном направлении ветра по данным спектрометра MODIS*

Еще одной интересной особенностью воздействия пылевой бури на верхний слой океана является стимуляция интенсивного развития фитопланктона в олиготрофных районах мирового океана. Это явление получило название оплодотворение (fertilization) океана пылью из пустынь [6]. В облаках пылевых бурь содержится значительное количество железа и др. микроэлементов, которые, выпадая в океан, приводят к интенсивному развитию фитопланктона, являясь для него питательной средой.

Фитопланктон, как пассивная примесь, вовлекается в циркуляцию и подчеркивает ее особенности в отдельных диапазонах видимой области спектра. Отметим, что максимум поглощения хлорофилла находится вблизи 440 нм. Интересным для нас оказались измерения на

океанской станции PAPA, выполненные в 2001г, после прохождения азиатской пылевой бури (Asian dust storm causes plankton to bloom in the robotic carbon explorers test the "Iron hypothesis", <http://www-ocean.ibl.gov>). Оказалось, что две недели спустя прохождения бури, концентрация органического углерода практически удвоилась.

Над Аральским морем преобладает западный перенос в атмосфере. Однако бывают и ветра восточных румбов. На рис. 3 представлены примеры пылевых бурь как раз для этого случая. Такие пылевые бури выносят большое количество песка и пыли в море. Кроме того они приводят и к подъему вод у восточного берега западного Арала. Последствия Аральской катастрофы уже давно вышли за рамки региона. С высохшей акватории моря ежегодно разносятся свыше 100 тысяч тонн соли и тонкодисперсной пыли с примесями различных химикатов и ядов, пагубно влияя на все живое. Стоки с местных полей стали причиной отложений из пестицидов и различных других сельскохозяйственных ядохимикатов, появляющихся местами на 54 тыс. км<sup>2</sup> сухого морского дна, покрытого солью. Пылевые бури разносят соль, пыль и ядохимикаты на расстояние до 500 км. Бикарбонат натрия, хлорид натрия и сульфат натрия переносятся по воздуху и уничтожают или замедляют развитие естественной растительности и различных сельскохозяйственных культур

([http://copypast.ru/2008/10/29/aralskoe\\_more\\_segodnja\\_17\\_foto.html](http://copypast.ru/2008/10/29/aralskoe_more_segodnja_17_foto.html)). Эффект загрязнения усиливается тем, что Арал расположен на пути мощного струйного течения воздуха с запада на восток, способствующего выносу аэрозолей в высокие слои атмосферы. А следы таких солевых потоков прослеживаются уже по всей Европе и даже в Северном Ледовитом океане.

### Апвеллинг

Под апвеллингом понимают подъем глубинных вод в морях и океанах, вызывающий значительное охлаждение поверхности моря. Различают два типа глубинного подъема вод: прибрежный апвеллинг и апвеллинг открытого океана. Прибрежный апвеллинг непосредственно связан с метеорологическими условиями - он возникает при сильном и продолжительном ветре, направленном приблизительно параллельно берегу, находящемуся слева от воздушного потока или под небольшим углом к нему, то есть с суши на море. При этом происходит сгон поверхностных вод и подъем на их место более холодных глубинных вод. Апвеллинг может наблюдаться в любом районе Мирового океана, но наиболее характерен он вдоль западных побережий материков. Апвеллинг может быть вызван ветровым сгоном поверхностных вод от берега, расходящимися течениями или течениями, отходящими от суши. В северном полушарии при устойчивых, дующих параллельно берегу ветрах, поверхностные воды сгоняются в сторону открытого моря, вызывая подъем глубинных вод. Апвеллинг открытого океана происходит там, где поверхностные воды растекаются в разные стороны, при этом глубинная вода начинает подниматься. Циклонические круговороты и вихри могут также вызвать вертикальные движения вод и привести к подъему воды. Размер вызванного ветром подъема вод зависит от характеристик ветра, а именно: скорости, продолжительности, разгона и направления. Вероятность подъема глубинных вод находится в соответствии с сезоном. Подъем вод в открытом океане вызывают также мощные ураганы, например, тропические циклоны.

В последние годы мы провели наблюдения за поверхностью Аральского моря, используя видимые и инфракрасные каналы аппаратуры спутников «ТЕРРА», «АКВА» и «НОАА». Оказалось, что в весенний период, когда начинается интенсивный прогрев приповерхностного слоя и образуется устойчивая термическая стратификация, наблюдается и апвеллинг в западной части Аральского моря. Так на приводимом примере на рис. 4 мы можем наблюдать интенсивный апвеллинг в середине мая 2005 г. Спутниковые изображения с «НОАА-12» и «НОАА-16» от 15 и 16 мая 2005г. были подвергнуты анализу во всех пяти спектральных интервалах. Результаты свидетельствовали, что центральная часть западного Арала была занята именно холодной апвеллинговой водой. Анализ измерений в видимой и ближней ИК области спектра свидетельствовал, что наблюдениям соответствовала ясная погода и чистая (отсутствие гидрометеоров и аэрозоля) атмосфера. Вместе с тем, измерения в термической ИК области (11 мкм) показывали наличие существенных контрастов в поле температуры поверхности моря. Спектральный анализ однозначно свидетельствовал о наличие аномально холодных вод в приповерхностном слое Аральского моря. Аналогичные и не менее яркие проявления апвеллинга были зафиксированы и весной 2008г. Общим в обоих случаях было проявление апвеллинга у восточного

берега западной части Арала и его последующее распространение в направлении противоположного берега. Причины образования апвеллинга у восточного берега западного Арала, по-видимому, обусловлены особенностями рельефа дна. У восточного берега происходит плавное изменение глубины (см. рис. 2), похожее на шельфовую зону в океанах. У западного берега, наоборот, наблюдается резкий свал глубин. Можно предположить, что именно поэтому вертикальная циркуляционная ячейка апвеллинга формируется у восточного берега и имеет существенные пространственные размеры. Возможно также влияние на апвеллинг и орографии побережья Аральского моря. Заметим, что западный берег восточного Арала низкий и экранирование ветрового потока просто невозможно.

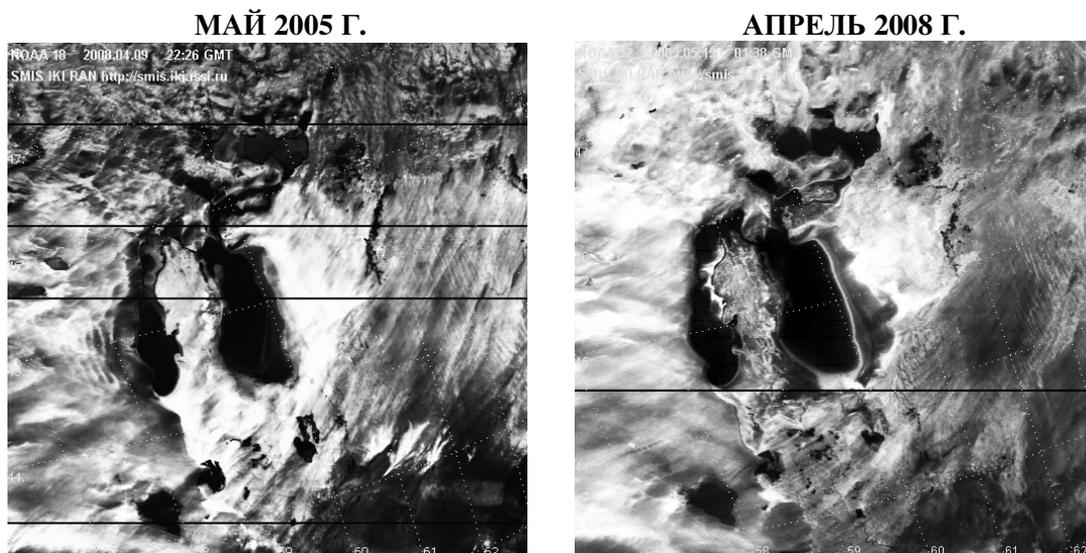


Рис. 4. Примеры апвеллинга в Западной части Аральского моря для весны 2005г. и весны 2008 г. по данным спутников NOAA. Данные со спутников получены с сайта Лаборатории "Информационной поддержки космического мониторинга" ИКИ РАН

## Заключение

С точки зрения автора, особенности подъёма вод в Арале во многом специфичны из-за влияния орографии побережья и особенности рельефа дна. Следует отметить, что в научной литературе практически отсутствуют работы [6], посвящённые рассматриваемому явлению. Вместе с тем, распространение холодных апвеллинговых вод представляется весьма важной чертой термической структуры и динамики Аральского моря. Рассмотренные примеры иллюстрируют дополнительные возможности исследования деталей морской циркуляции при использовании спутниковых изображений с приборов MODIS и AVHRR в условиях интенсивного ветра и пылевых бурь. Автор надеется, что поднятые вопросы привлекут внимание к исследованиям динамики вод Аральского моря с использованием космической информации.

## Литература

1. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
2. Стрешнев Р. Процесс высыхания Аральского Моря // Красная Звезда. 12.09.2001.
3. Zavalov P.O. Physical oceanography of the Dying Aral Sea. Berlin; Heidelberg, Springer, 2005. 154 p.
4. Perkins S. Dust, the Thermostat // Science News Online. Sept.29, 2001. Vol.160. No. 13. P.200.
5. Claustre H., A. Morel, S. B. Hooker, M. Babin, D. Antoine, K. Oubelkheir, A. Bricaud, K. Leblanc, B. Quéguiner, S. Maritorena. Is desert dust making oligotrophic waters greener? // Geophysical Research Letters, 2002, vol.29, No 10, 10.1029/2001cl014056.
6. Meskhidze N., Chameides W.L., Nenes A. Dust and pollution: a recipe for enhanced ocean fertilization? //Journal of Geophysical research, vol.110, D03301, doi: 10.1029/2004jd005082, 2005.
7. Sklyarov V.E. Aral Sea: dust storms and upwelling // Geophysical Research Abstracts, vol. 10, EGU2008-A-00000, EGU General Assembly, 2008.

# Dust storms and upwelling in the Aral Sea

V.E. Sklyarov

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS*

Dust storms represent a global phenomenon occurring regularly and have an impact on the dynamics of the water in the oceans and seas. Also important is the water saturation by the Fe contained in the dust particles. The latter fact leads to fertilization of the ocean by Fe elements.

The Aral Sea is surrounded by dry lands and desert. Strong north-eastern winds may lead to pronounced dust storms. The examples of such storms appear in the images of AQUA and TERRA satellites are given.

However, strong and steady strong winds may cause upwelling in the western part of the Aral Sea. An example is given in the case of pronounced upwelling on mid-May 2005. NOAA-12 and NOAA-16 satellite images on 15 and 16 May 2005 were analyzed in all spectral intervals. It is clearly seen that the central part of the Aral Sea is occupied by the cold upwelling waters. Analysis of the images in the visible and near IR spectrum shows clear and clean (no aerosols) atmosphere. Simultaneously, the data in the thermal IR channels show the existence of significant thermal inhomogeneities on the sea surface. One can see that the upwelling event occurs off the east coast of western Aral Sea and extends to the opposite shore. One can detect the separate jets in the field of the maximum distribution of the upwelling waters. We note that main topic of the presentation is poorly covered in the scientific literature. However, the upwelling is of great interest for studies of the dynamical features in the Aral Sea.

**Keywords:** Aral Sea, dust storms, upwelling, remote sensing.