

## Эволюция температурного режима Аральского моря в 1982–2009 гг. по спутниковым данным

А.И. Гинзбург, А.Г. Костяной, Н.А. Шеремет

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
117997 Москва, Нахимовский проспект, 36  
E-mail: sheremet@ocean.ru*

На основе еженедельных данных проекта Pathfinder (quality 3; пространственное разрешение 4 км, разрешение по температуре 0.1°C) исследована эволюция температуры поверхности моря (ТПМ) трех регионов Аральского моря (в западной и восточной частях Большого моря и в Малом море) в 1982–2009 гг. Выявлены региональные особенности эволюции сдвига весенней и осенней фаз сезонного цикла температуры по сравнению с условно-естественным периодом, прослежена динамика среднемесячных значений ТПМ в теплое время года. В относительно глубоководных регионах западной части Большого моря и Малого моря итоговый сдвиг весенней и осенней фаз к 2009 г. составил примерно месяц в сторону их более раннего наступления, в усыхающем восточном Арале – примерно 40 и 35 дней соответственно. Максимумы летних ТПМ во всех трех регионах к 2009 г. сместились с середины августа на вторую половину июля. В течение всего периода 1982–2009 гг. (1982–2006 гг. для восточной части Большого моря) происходило увеличение максимальной летней температуры, причем с начала 1990-ых гг. и до 2006 г. летний максимум ТПМ в восточной части Большого моря был выше, чем в западной. Годовой размах среднемесячных ТПМ в Большом море к 2009 г. превысил 28°C. Выявленные изменения в температурном режиме Аральского моря хорошо согласуются с прогнозами, сделанными в 1950–1980-х гг. в связи с ожидаемым усыханием Арала. Дополнительным фактором, способствовавшим этим изменениям, явилось, возможно, потепление в среднеазиатском регионе, наблюдающееся с 1960-х годов.

**Ключевые слова:** Аральское море, Большое море, Малое море, температура поверхности моря, фаза сезонного цикла температуры

### Введение

Аральское море – замкнутый бассейн в зоне пустынь Средней Азии, в режиме которого (гидрологическом, гидрохимическом, гидробиологическом) в современный антропогенный период (с 1961 г.) произошли катастрофические и уже необратимые изменения, связанные в основном с безвозвратным изъятием стока питающих море рек Амударьи и Сырдарьи на нужды орошения. За этот период существенно изменились морфометрические параметры Аральского моря (рис. 1, 2): его суммарная площадь сократилась с 66400 км<sup>2</sup> в 1961 г. до 10400 км<sup>2</sup> в 2008 г. (в основном за счет мелководной восточной части); к 1989 г. Малое море отделилось от Большого, и с 2005 г. (после возведения пятой по счету дамбы между Малым и Большим морями) наблюдается заметный рост его уровня; к 2001 г. произошло фактическое разделение Большого моря на западную и восточную части, соединяющиеся лишь узким проливом на севере (Гинзбург и др., 2010; Ginzburg et al., 2010). Таким образом, с начала XXI века Арал представляет собой три отдельных водоема (не считая отделившийся в 2004 г. залив Тшебас) со своими собственными гидрологическими режимами, причем соленость вод в Малом море, с 2004 г. не превышавшая 18‰ (Aladin et al., 2005), в настоящее время равна 10–14‰ (Micklin, 2010), тогда как Большое море превратилось в гиперсоленый бассейн с соленостью вод более 100‰ (Zavialov, 2005; Micklin, 2010). Кроме того, к осени 2009 г. произошло почти полное усыхание восточной части Большого моря (рис. 2в). И хотя спутниковые изображения 2010 г. и весны 2011 г. (рис. 2г) показывают за-

полнение восточной части Арала водой, это, скорее всего, временное явление, связанное, возможно, с повышенным стоком Амударьи в 2010 г. или со сбросом воды из Малого моря. Как показали натурные измерения в западной части Арала в 2010 г. (личное сообщение П.О. Завьялова), уровень Большого моря продолжает падать.

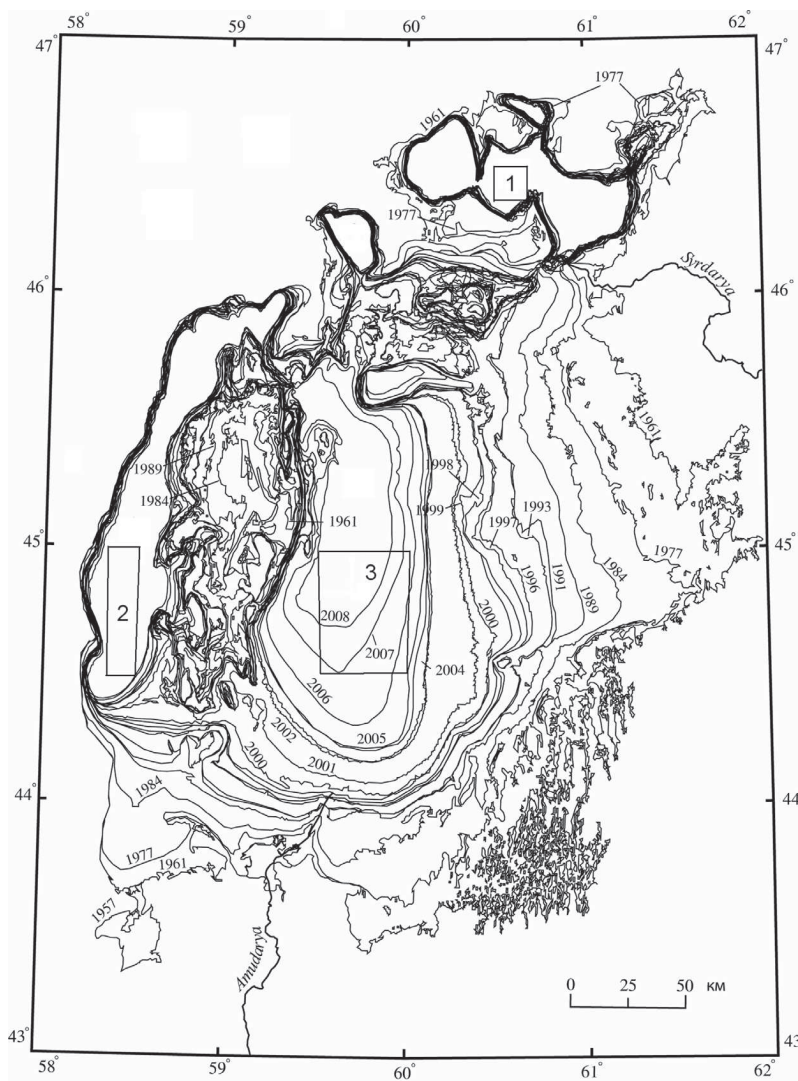
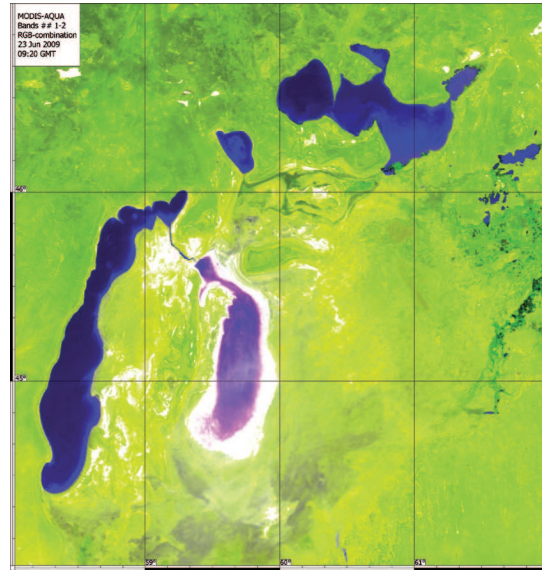


Рис. 1. Карта изменения береговой линии Аральского моря в период 1957–2008 гг. (Гинзбург и др., 2010).  
1, 2 и 3 – регионы, в которых прослеживалась эволюция ТПМ в 1982–2009 гг.

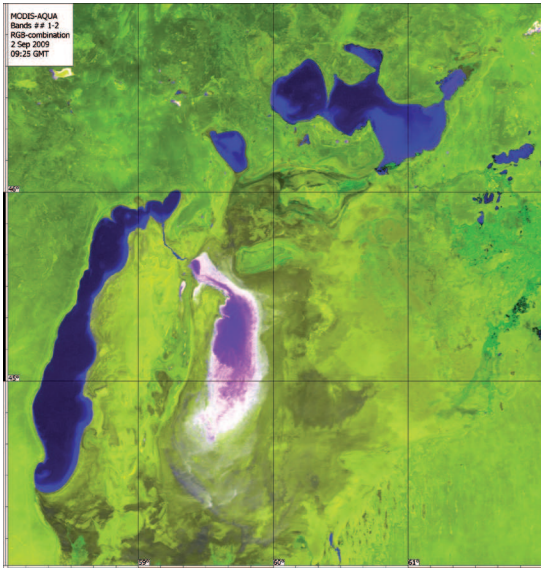
Существенные изменения морфометрических характеристик Арала и связанные с ними изменения теплозапаса и температуры замерзания должны были привести к заметным изменениям температурных режимов трех его водоемов. Результаты исследования изменений термического режима Аральского моря до 2000 г. (тогда Большое море было еще единым бассейном), выполненного на основе спутникового массива данных MCSST (Multi-Channel Sea Surface Temperature) с пространственным разрешением 18 км, представлены в работах (Small et al., 2001; Гинзбург и др., 2002; Ginzburg et al., 2003). В данной статье эволюция температуры поверхности моря (ТПМ) Арала в период 1982–2009 гг. прослежена на основе доступных через Интернет еженедельных данных проекта Pathfinder (quality 3; пространственное разрешение 4 км, разрешение по температуре 0.1°C), основанных на измерениях AVHRR-радиометров спутников NOAA.



А



Б



В



Г

Рис. 2. Спутниковые изображения Аральского моря: (а) 15 августа 2006 г. (MODIS/Aqua), (б) 23 июня 2009 г. (MODIS/Aqua), (в) 2 сентября 2009 г. (MODIS/Aqua), (г) 16 апреля 2011 г. (MODIS/Terra).

Изображения 2а и 2г получены через Интернет с сайтов соответственно <http://earthobservatory.nasa.gov/Features> и <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>, рис. 2б и 2в обработаны Д.М. Соловьевым (МГИ НАНУ, г. Севастополь)

### Изменения температуры в регионах Аральского моря

Рисунки 3–4 демонстрируют региональные особенности эволюции ТПМ (1982–2009 гг.), осредненной в пределах тех же регионов 1–3 Арала (рис. 1), что и в предыдущих работах авторов (Гинзбург и др., 2002; Ginzburg et al., 2003). В условно-естественный период (до 1961 г., при уровне моря 53 м абс.) эти регионы находились в пределах изобат примерно 20, 25–60 и 25 м соответственно (см. рис. 1 в (Самойленко, 1953)).

Прежде всего, очевиден сдвиг весенней и осенней фаз сезонного температурного цикла в Большом море к 2009 г. в сторону их более раннего наступления по сравнению с условно-естественным периодом (рис. 3), причем эволюция этого сдвига в глубоководной



западной и мелководной восточной частях Большого моря происходила по-разному. В западном бассейне (регион 2, рис. 3а) наибольшие сдвиги фаз весной и осенью имели место до 1993 г., когда падение уровня относительно 1961 г. составило примерно 16 м; в последующие 7 лет (до 2000 г., падение уровня еще на 3.5 м) весенний сдвиг продолжался в сторону более раннего наступления, тогда как осенний – слегка в противоположном направлении; позднее (до 2009 г., падение уровня еще примерно на 5 м) дальнейшего сдвига температурных фаз практически не наблюдалось. Итоговый сдвиг весенней и осенней температурных фаз к 2009 г. по сравнению с условно-естественным периодом составил здесь примерно 35 и 30 дней соответственно.

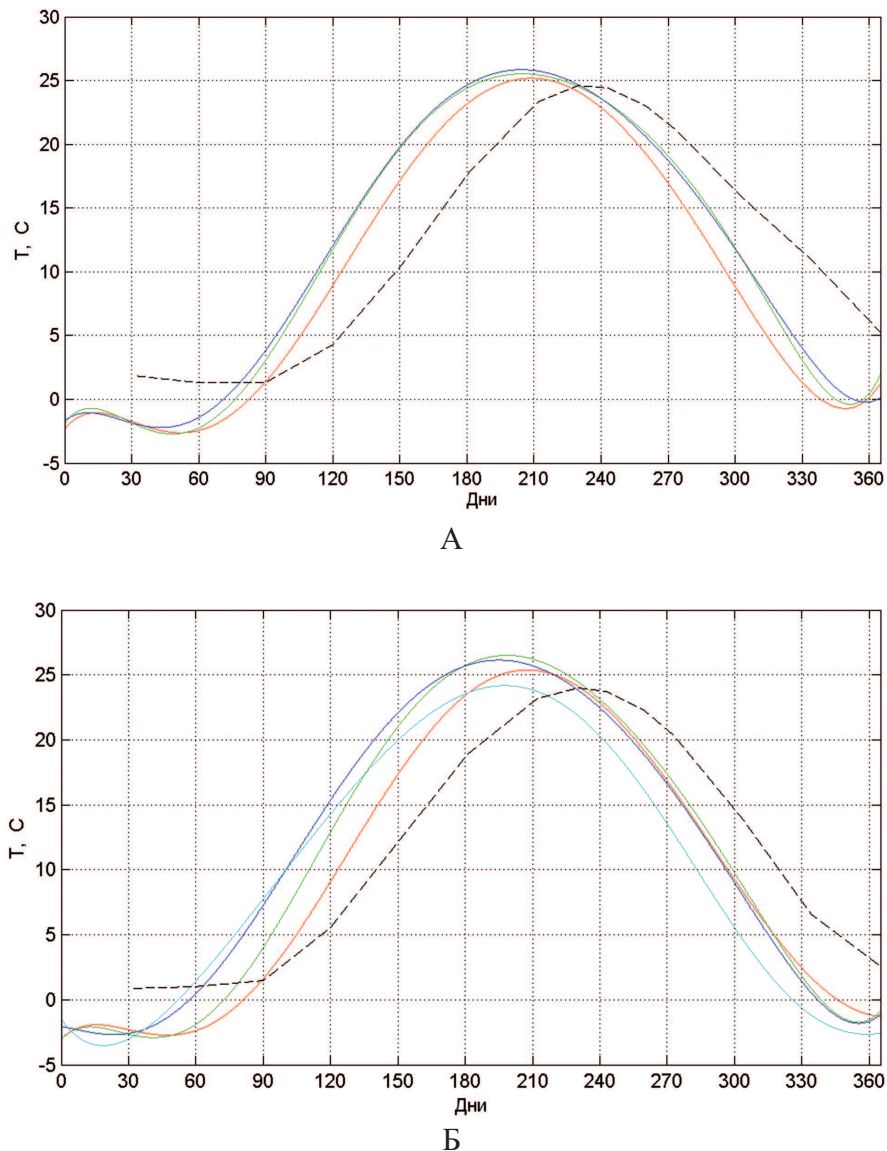


Рис. 3. Сезонные циклы ТПМ регионов 2 (а) и 3 (б) Большого моря (1982–2009 гг.). Пунктирная линия соответствует сезонным циклам ТПМ в условно-естественный период (Гидрометеорология... 1990), красная – осреднению за 1982–1993 гг., зеленая – осреднению за 1994–2000 гг., синяя – осреднению за 2001–2009 гг. для рис. 3а и 2001–2006 гг. для рис. 3б, голубая на рис. 3б – осреднению за 2007–2009 гг. Все кривые построены путем аппроксимации исходных данных полиномами седьмой степени

Существенный сдвиг весенней и осенней температурных фаз в сторону более раннего наступления в восточном бассейне (регион 3, рис. 3б) наблюдался, как и в западном, до 1993 г. Сдвиг весенней фазы в том же направлении продолжался до 2006 г. Осенняя фаза в

1994–2000 гг. слегка сместилась относительно 1982–1993 гг. в противоположном направлении; в дальнейшем происходил ее сдвиг снова в сторону более раннего наступления, особенно заметный в 2007–2009 гг. Соответственно итоговый сдвиг весенней и осенней температурных фаз в период с 1961 по 2009 г. здесь составил примерно 40 и 35 дней. При этом фазы весеннего прогрева и осеннего выхолаживания в сезонном цикле в 2000-х годах в восточном бассейне наступали раньше, чем в западном и в Малом море. Отличия динамики сезонного цикла ТПМ в восточном бассейне от таковых в западной части Большого Арала и Малого моря (рис. 4) были обусловлены, по-видимому, существенно меньшей глубиной этого высыхающего водоема.

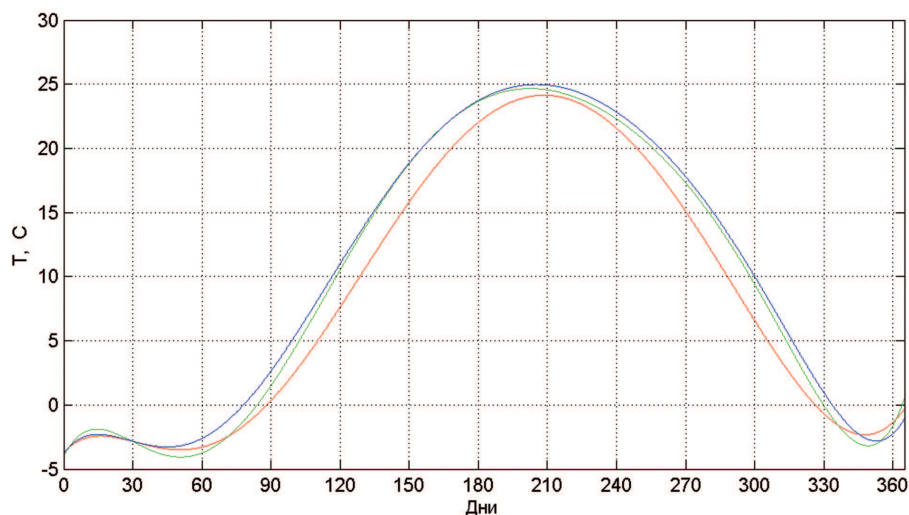


Рис. 4. Сезонные циклы ТПМ региона 1 (1982–2009 гг.). Обозначения – как на рис. 3

Характер эволюции сезонного цикла ТПМ в относительно глубоководной части Малого моря (регион 1) в 1982–2009 гг., судя по схожей картине на рис. 3а и 4, был примерно таким же, как в западной части Большого моря. Весеннее потепление начиналось в этом более северном водоеме позже, а осеннее выхолаживание – раньше, чем в регионе 2 (и 3 для средних за 1982–1993 гг. сезонных циклов).

Можно отметить (см. рис. 3 и 4), что максимумы летних ТПМ во всех трех регионах к 2009 г. сместились примерно на месяц, с середины августа на вторую половину июля (в обмелевшем восточном бассейне – на середину июля). В течение всего периода 1982–2009 гг. (1982–2006 гг. для восточной части Большого Арала) происходило увеличение максимальной летней температуры. С начала 1990-ых гг. и до 2006 г. летний максимум ТПМ в восточной части Большого Арала был выше, чем в западной, в отличие от предшествовавшего (в том числе и условно-естественного) периода; то есть разность температур между относительно глубоким западным и мелководным восточным регионами Большого моря изменила знак (см. рис. 3). Это явилось следствием, с одной стороны, обмеления моря и распространением прогрева в восточном регионе на более тонкий слой, с другой – уменьшения (в итоге – практически прекращения) водо- и теплообмена между восточным бассейном и более холодным Малым морем и между двумя регионами Большого моря. Уменьшение максимума ТПМ в усыхающем регионе 3 после 2006 г. связано, возможно, с методическими ошибками определения ТПМ в этом почти пересохшем квадрате водоема.

Динамика среднемесячных значений ТПМ ( $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  для регионов 1–3) в теплое время года в 1982–2009 гг. иллюстрируется таблицей. По сравнению с 1950-ми гг. (Ромашкин, Самойленко, 1953) значения ТПМ в 2001–2009 гг. увеличились в мае примерно на  $5^\circ\text{C}$  в регионах 1 и 2 и на  $7^\circ\text{C}$  в регионе 3; в августе они возросли примерно на 1 и  $0.5^\circ\text{C}$  в Малом море и в западном водоеме соответственно, тогда как в еще не высохшей восточной части Большого моря ТПМ уменьшилась на  $0.7^\circ\text{C}$ ; средняя за ноябрь температура практически не изменилась в Малом море, уменьшилась примерно на  $2.5^\circ\text{C}$  в западном водоеме и на  $4.8^\circ\text{C}$  в оставшейся восточной части Большого моря.

В течение всего рассматриваемого периода наблюдалась заметная межгодовая изменчивость сезонных циклов и отсутствие при этом однонаправленного сдвига фаз, что показано на примере западного бассейна в период с 1995 по 2008 г. на рис. 5. Заметим также, что средние за неделю и месяц значения ТПМ в работах (Гинзбург и др., 2002; Ginzburg et al., 2003) и в настоящем исследовании, основанных на разных глобальных массивах данных (MCSST и Pathfinder с пространственным разрешением 18 и 4 км соответственно), не всегда совпадают, к тому же в ноябрьских данных много пропусков. Однако это не сказывается на выявленных закономерностях динамики термического режима бассейнов Арала.

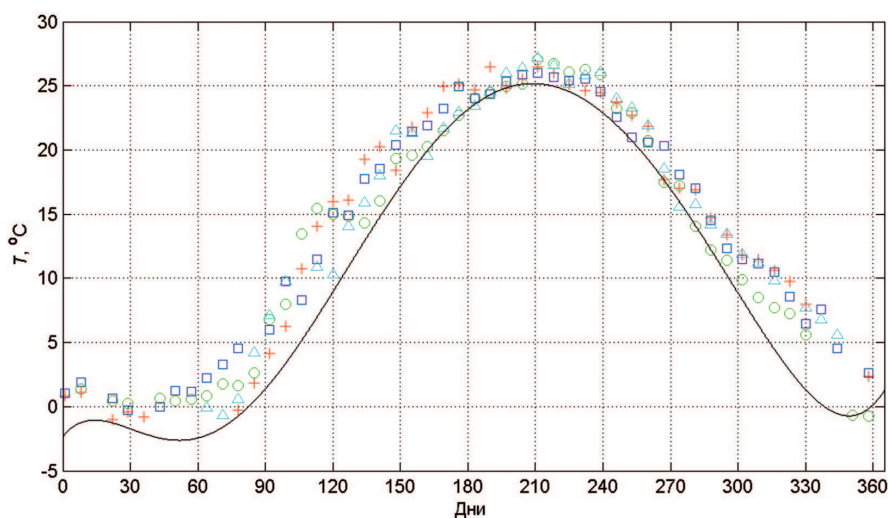


Рис. 5. Наложение сезонных циклов недельных значений ТПМ в 1995 (красные крестики), 2000 (зеленые кружки), 2004 (синие квадраты) и 2008 (голубые треугольники) гг. в регионе 2. Сплошная линия соответствует усреднению за 1982–1993 гг. на рис. 3а

Из-за увеличенной средней за июль ТПМ (выше  $25^\circ\text{C}$ ) и уменьшенной зимней температуры (ниже  $-3^\circ\text{C}$ ) годовой размах среднемесячной ТПМ в Большом море к 2009 г. превысил  $28^\circ\text{C}$  (он не превышал  $24^\circ\text{C}$  в условно-естественный период (Самойленко, 1953)). Кроме того, нижний предел температурного диапазона глобальных данных проекта Pathfinder искусственно установлен на уровне  $-3^\circ\text{C}$  (в расчете на воды с океанской соленостью, температура замерзания  $T_{\text{фр}}$  которых не ниже данного значения), тогда как  $T_{\text{фр}}$  в Большом море к настоящему времени из-за роста солености понизилась примерно до  $-7^\circ\text{C}$  (Stanichny et al., 2005) (в условно-естественный период при солености 10‰ она была около  $-0.5 - -0.7^\circ\text{C}$ ). Так что реальный годовой размах среднемесячных ТПМ может быть выше  $30^\circ\text{C}$  (и еще выше – средних за неделю или суточных значений). Например, обработкой исходного массива AVHRR-данных 2002–2004 гг. получен годовой размах суточных ТПМ  $37^\circ\text{C}$  (при  $T_{\text{фр}} = -7^\circ\text{C}$ ) в открытых водах Арала (Stanichny et al., 2005). Заметим также, что из-за высокой со-

лености воды  $T_{fr}$  стала выше температуры максимальной плотности (см. (Ginzburg et al., 2003)). Интересно, что лед на спутниковых инфракрасных изображениях теплее, чем вода (Stanichny et al., 2005).

### Заключение

Выполненный анализ показал, что к 2009 г. произошли существенные изменения в температурном режиме Аральского моря по сравнению с условно-естественным периодом. Совпадение тенденций этих изменений (сдвиг весенней и осенней температурных фаз в Большом море примерно на месяц в сторону их более раннего наступления, более высокая максимальная температура в мелководной восточной части моря относительно «глубоководной» западной до 2006 г., увеличение годового размаха ТПМ) с прогностическими оценками 1950–1980 гг. (см. (Самойленко, 1953; Гидрометеорология...1990; Ginzburg et al., 2003)) дает основание полагать, что произошедшие изменения в температурном режиме моря были обусловлены главным образом уменьшением его глубины и теплозапаса.

Не исключено также, что дополнительным фактором, обусловившим наблюдаемые сдвиги температурных фаз (весенней, летней и осенней) и постепенный рост летних ТПМ в относительно глубоководных бассейнах Арала до 2009 г. (рис. 3–5), причем в Малом море в 2001–2009 гг. наблюдался рост уровня (Гинзбург и др., 2010; Ginzburg et al., 2010), явилась крупномасштабная и/или региональная климатическая изменчивость. В частности, температура воздуха над Средней Азией в период между 1960 и 1991 г. увеличилась в среднем на  $1.5^{\circ}\text{C}$  (Small et al., 2001), а в районе Аральского моря с 1979 г. по 2010 г. она увеличилась уже на  $2^{\circ}\text{C}$  (рис. 6). Все это указывает на дальнейшее потепление в данном регионе. Кроме того, физические процессы, связанные с обмелением моря (например, изменившиеся условия вертикального перемешивания) могут влиять на скорость изменения ТПМ.

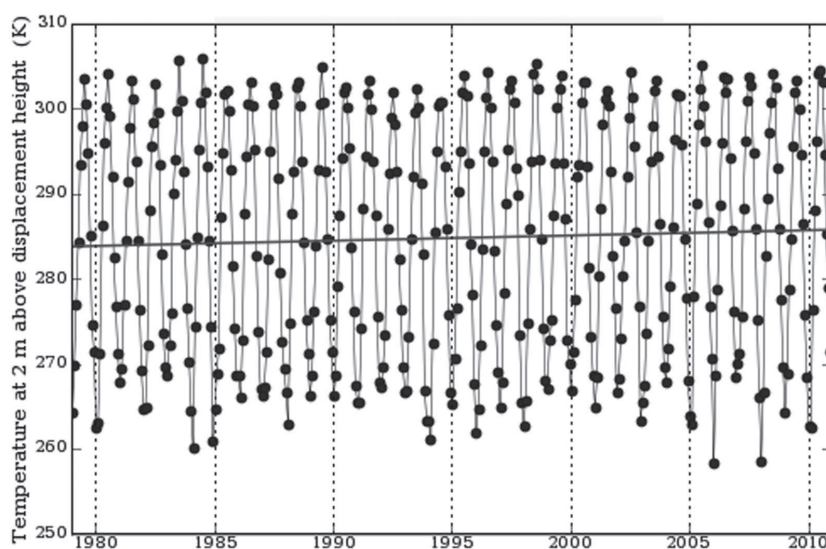


Рис. 6. Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений температуры воздуха над районом Аральского моря ( $43\text{--}47^{\circ}$  с.ш.,  $58\text{--}61^{\circ}$  в.д.) за 1979–2010 гг. (NASA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, Giovanni, <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>).

Линия показывает линейный тренд температуры

В настоящее время в Аральском море остаются практически только два относительно крупных изолированных бассейна – все еще глубокая, хотя и с неизменной тенденцией к понижению уровня западная часть Большого моря и Малое море, уровень в котором после возведения плотины в бывшем проливе Берга продолжает расти. Мониторинг температуры поверхности этих двух бассейнов (как и их морфометрических параметров и уровня) на основе спутниковой информации целесообразно продолжать.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-05 00097а).

Таблица. Среднемесячные значения ТПМ (май, июль, август, ноябрь) (°С) в регионах 1–3 Арала в 1982–2009 гг. по данным проекта Pathfinder

Месяц	Годы	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
Май	1982–2009	15.5	16.0	16.9
	1982–1993	14.3	14.3	14.4
	1994–2000	15.7	16.6	17.8
	2001–2009	16.9	17.6	19.5
	2001–2006	17.2	17.7	20.3
	2007–2009	16.4	17.5	17.9
	1950-е гг.*	12.0	12.5	12.5
Июль	1982–2009	24.1	25.1	25.4
	1982–1993	23.6	24.7	24.9
	1994–2000	23.4	24.3	25.3
	2001–2009	24.4	25.3	25.4
	2001–2006	24.3	25.0	25.8
	2007–2009	24.8	25.8	24.5
Август	1982–2009	23.5	24.5	24.1
	1982–1993	22.8	23.9	24.1
	1994–2000	23.7	25.2	25.0
	2001–2009	24.1	24.9	23.3
	2001–2006	24.0	24.9	24.2
	2007–2009	24.3	24.9	21.5
	1950-е гг.*	23.0	24.5	24.0
Ноябрь	1982–2009	5.1	7.7	4.7
	1982–1993	5.1	6.5	5.3
	1994–2000	4.5	8.2	4.4
	2001–2009	5.7	8.4	4.2
	2001–2006	6.3	8.6	4.7
	2007–2009	4.6	7.7	2.5
	1950-е гг.*	5.5	11.0	9.0

\* В соответствии с (Ромашкин, Самойленко, 1953).



## Литература

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. VII. Аральское море / Под ред. В.Н. Бортника, С.П. Чистяевой. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 195 с.
2. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Термический режим Аральского моря в современный период (1982–2000 гг.) по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2002. № 4. С. 62–69.
3. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А., Кравцова В.И. Спутниковый мониторинг Аральского моря // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. М.: ИГКЭ, 2010. С. 150–193.
4. Ромашкин В.С., Самойленко В.С. Гидрометеорологическая характеристика Аральского моря // Труды ГОИН, 1953. Вып. 014. 59 с.
5. Самойленко В.С. О предстоящих изменениях в температурном режиме Аральского моря // Тр. ГОИН. 1953. Вып. 012. С. 130–142.
6. Aladin N., Crétau J.-F., Plotnikov I.S. et al. Modern hydro-biological state of the Small Aral Sea // *Environmetrics*. 2005. V. 16. № 4: 375. DOI: 10.1002/env.709.
7. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A. Thermal regime of the Aral Sea in the modern period (1982–2000) as revealed by satellite data // *J. Mar. Syst.* 2003. V. 43. P. 19–30.
8. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Sheremet N.A., Kravtsova V.I. Satellite monitoring of the Aral Sea Region // In: A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev (eds.). *The Aral Sea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 7. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2010. P. 147–179.
9. Micklin P. The past, present and future Aral Sea // *Lakes & Reservoirs: Research and Management*. 2010. V. 15. P. 193–213.
10. Small E.E., Giorgi F., Sloan L.C., Hosteller S. The effects of desiccation and climatic change on the hydrology of the Aral Sea // *J. Climate*. 2001. V. 14. P. 300–322.
11. Stanichny S., Djenidi S., Stanichnaya R., Soloviev D. Satellite monitoring of the Aral Sea. // *Geophysical Research Abstracts*. 2005. V. 7, 01163. SRref-ID:1607-7962/gra/EGU05-A-01163.
12. Zavalov P. *Physical Oceanography of the Dying Aral Sea*. Springer- Praxis Publishing, Chichester, UK, 2005. 146 p.

## Evolution of temperature regime of the Aral Sea during 1982–2009 according to satellite data

A.I. Ginzburg, A.G. Kostianoy, N.A. Sheremet

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences  
36, Nakhimovsky Pr., Moscow, 117997, Russia  
E-mail: sheremet@ocean.ru*

Evolution of sea surface temperature (SST) in three regions of the Aral Sea (in the western and eastern areas of the Large Sea and in the Small Sea) during 1982–2009 is investigated on the base of weekly Pathfinder data (quality 3; spatial resolution of 4 km, temperature resolution of 0.1°C). Regional evolution features of the shear of spring and autumn phases of the seasonal temperature cycle are revealed as compared with the conditionally natural period, dynamics of mean monthly SST values during the warm season is traced. In the relatively deep regions of the western Large Sea and Small Sea, overall shift of spring and autumn phases by 2009 amounted to about a month towards their earlier onset, whereas in the shrinking eastern Aral they were about 40 and 35 days, respectively. By 2009, maximum values of summer SST in all three regions shifted from mid-August to the second half of July. During the whole period 1982–2009 (1982–2006 for eastern part of the Large Aral), an increase of maximum summer SST occurred, in which case summer SST maximum in the eastern Large Sea was higher than in the western one from the beginning of the 1990s to 2006. Annual range of the mean monthly SSTs in the Large Sea exceeded 28°C by 2009. The revealed changes in temperature regime of the Aral Sea are in good agreement with the predictions made in 1950–1980 in connection with the expected Aral desiccation. An additional factor contributing to these changes, was perhaps the warming in the Central Asian region observed since the 1960s.

**Keywords:** the Aral Sea, the Large Sea, the Small Sea, sea surface temperature, phase of seasonal temperature cycle