

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АРКТИКЕ, СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ, РАЙОНЕ КАСПИЯ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ

Панин Г.Н.

*Институт водных проблем РАН 119333 Москва, ул. Губкина, 3, E-mail:
panin@aqualaser.ru*

ВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования указывают на возможность будущего потепления климата, вызванного антропогенным ростом парниковых газов. Данные наблюдений кроме того показывают, что глобальный и, в особенности, региональный климат может претерпевать заметные вариации (Володин и Дианский, 2006, Израэль, 2006, Семенов, 2008, Семенов и др., 2012, Груза и др., 2008, Мохов и др., 2008, Панин и др., 2009, Бышев и др., 2012, Mokhov et al., 2012). На фоне глобального потепления можно ожидать значительных флуктуаций климата в разных регионах, вызванные, в частности, обратными связями в системе атмосфера – полярные льды – океан. Заметим, что оценки колебания земного климата, вызванные этими обратными связями, указывают на возможность существенной переоценки чувствительности глобальных климатических моделей к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере [Семенов, 2012]. Следует заметить, что существует некоторая неопределенность в отношении воспроизводимости моделями региональных изменений и, в частности, изменений климата Арктики, Атлантики, Каспийского региона, которые характеризуются чрезвычайно большим разнообразием, взаимосвязями.

В связи с этим в настоящей работе анализируется климат указанных регионов, и наибольшее внимание уделено Каспийскому морю, его связи с процессами глобального характера, и прежде всего в Северной Атлантике. Внимание к Каспию связано с тем, что, несмотря на многочисленные публикации до сих пор не удавалось получить объяснение изменения уровня Каспийского моря, и, следовательно, сформировать его прогноз. Более того сторонники геологической и климатической версий изменения уровня моря не находят согласованности в этом принципиальном вопросе.

ПРИМЕРЫ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТИЧЕСКОГО МАСШТАБА

АРКТИКА

Заметим, что проблемой изменения климата полярных зон Земли, и, в особенности Арктики, занимаются давно и основательно. Можно выделить работы Folland et al. 2001, Parker et al. 1994, Rayner et al. 2003, Johannessen et al. 2002, Khorostovsky et al. 2003),

Bengtsson et al. 2004, Polyakov et al. 2003, Мохов и др. 2002, Школьник и др. 2006, Семенов 2008, и др., Семенов, 2012.

Важнейшая особенность климата Арктики в прошедшем столетии – неоднократные его изменения. Объяснения вариации векового хода региональной температуры пока не существует. По крайней мере, при моделировании климата Арктики трехкратную смену направления тенденций температуры в XX в. не воспроизводят признанные модели (рис. 1).

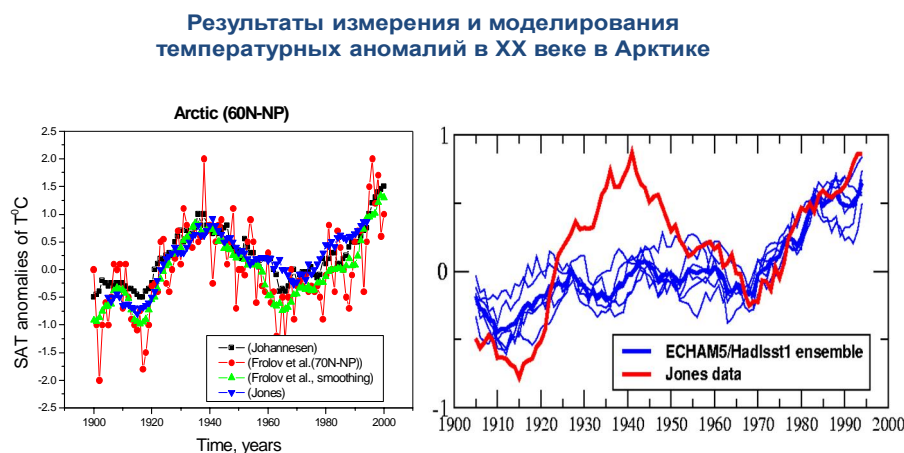


Рис. 1 Аномалии температуры приземного воздуха в холодный период года осредненные по территории Арктики и результаты моделирования.

Реконструкция температуры в Гренландии по O_{18} показывают, что и в XIX веке наблюдались заметные вариации климата (рис. 2).

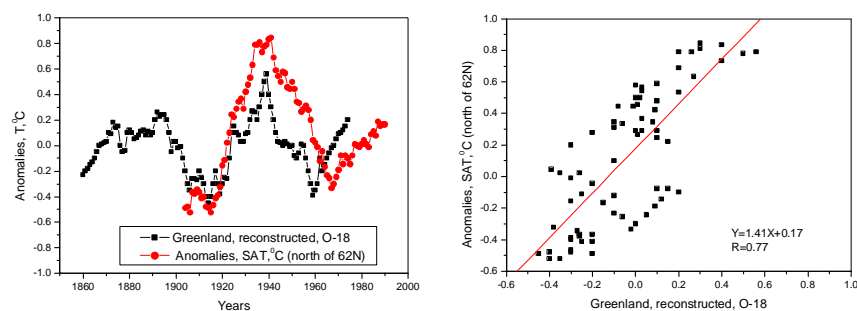


Рис. 2 Аномалии температуры приземного воздуха в холодный период года осредненные по территории Арктики (красный цвет) и результаты реконструкция температуры в Гренландии по O_{18} в IX и XX столетиях (черный цвет), справа, - зависимость между аномалиями температуры измеренными и восстановленными по O_{18} .

Период инструментальных измерений температуры в Антарктиде значительно короче, чем в Арктике и поэтому были рассмотрены данные палеоклиматических исследований ледяного керна на станции Восток (Фролов и др., 2007). Данные, предварительно сглаженные скользящим фильтром по 9-ти точкам, иллюстрируют, что за период более чем 200 лет в Антарктиде определенно выделяется квазипериодическая составляющая изменения температуры (рис. 3).

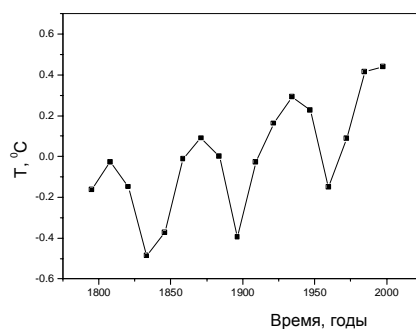


Рис. 3. Изменение аномалий температуры воздуха в Антарктиде по данным изотопных исследований на ст. Восток (Фролов и др., 2007), сглаженное автором при помощи скользящего фильтра по 9-ти точкам.

В целом рисунки 1-3 свидетельствуют о том, что в полярных зонах Земли наблюдаются некоторые квазипериодические колебания температуры, природа которых не установлена, но определенная коррелированность их между собой может говорить о глобальном характере их изменений.

Взаимный спектральный анализ между температурными колебаниями в полярных зонах показывает, что в значительной части (периоды больше ~10 лет) колебания в Арктике и Антарктиде синфазны и когерентны (коэффициент когерентности достигает 0.6).

Когерентность и сдвиг фаз между изменениями температур в Арктике и Антарктиде

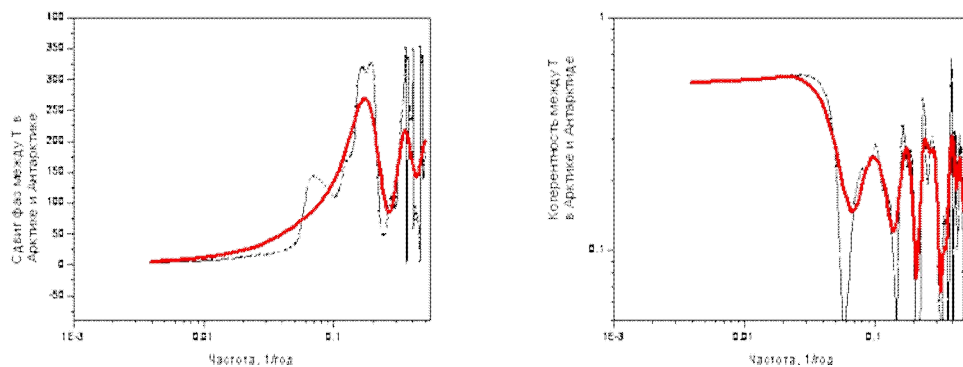
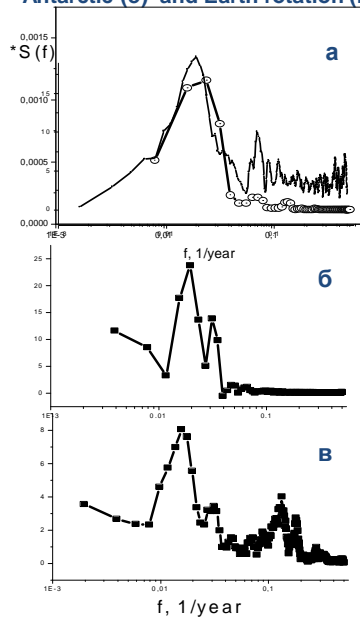


Рис. 4 Когерентность и сдвиг фаз между изменениями температур в Арктике и Антарктиде.

Спектральный и wavelet анализ колебаний температуры в Арктике и в Антарктиде выявил значимый пик на периоде около 60 лет (рис. 5 а, б).

Spectra of the temperature in the Arctic (a), Antarctic (б) and Earth rotation (в)



Wavelet analysis of the HadCRUT3 global temperature anomalies
The ~62-year cycle is clearly visible.

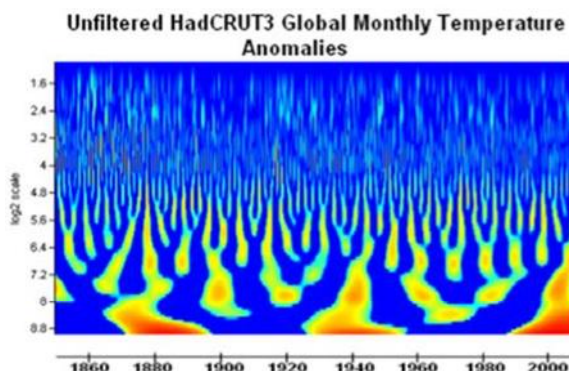
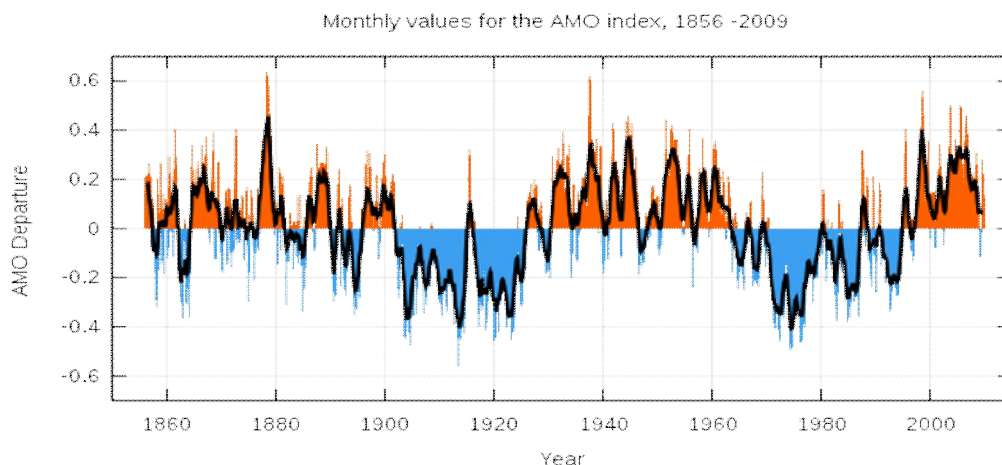


Рис. 5 Спектральный анализ колебаний температуры в Арктике (а), Антарктиде (б), угловой скорости вращения Земли (в) и данные wavelet анализа аномалий глобальной температуры [<http://wattsupwiththat.com/2009/05/23/evidence-of-a-lunisolar-influence-on-decadal-and-bidecadal-oscillations-in-globally-averaged-temperature-trends/>].

АТЛАНТИКА

Известно, что процессы климатического масштаба в северной Атлантики характеризуются, как правило, индексами NAO, АМО, изменчивостью термохалинной циркуляции океана АТХЦ. Изменчивость этих индексов (рис. 6) свидетельствует о том, что и в Атлантике наблюдаются периодические колебания близкого к 60 годам периода.



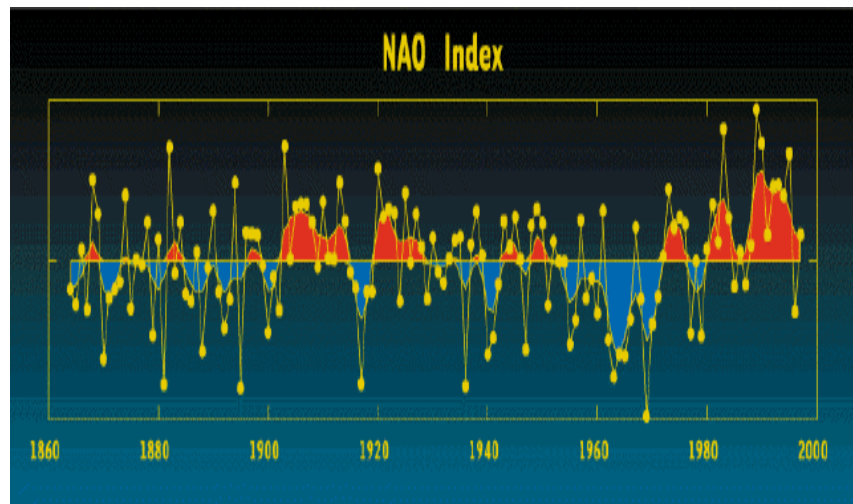


Рис. 6 Изменчивость индексов АМО и NAO
[\[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Amo_timeseries_1856-present.svg\]](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Amo_timeseries_1856-present.svg).

Все это послужило основой для выработки нового сценария возможных климатических изменений в будущем, базирующемуся на композиции «парникового» и «циклического» эффектов (Панин, 2009, Панин и др., 2009).

$$T(x, y, t) \approx T_{IPCC}(x, y, t) \pm \Delta T(x, y, t) \quad (1)$$

где: $T(x, y, t)$ - прогнозируемая температура приземного воздуха, $T_{IPCC}(x, y, t)$ - температура, прогнозируемая МГЭИК, $\Delta T(x, y, t)$ - циклические изменения температуры приземного воздуха.

В первом приближении предложено учитывать циклический эффект в виде (Панин, 2009):

$$T(x, y, t) \approx T_{IPCC} + k \sin \alpha t, \quad (2)$$

где: k – эмпирический коэффициент, характеризующий географическую широту (на полюсе k принимает максимальное значение, а с приближением к экватору стремится к нулю).

Этот сценарий региональных климатических изменений фактически представляет собой линейный рост температуры, который усложнен квазипериодическими изменения с периодом 30-35 лет (рис. 7).

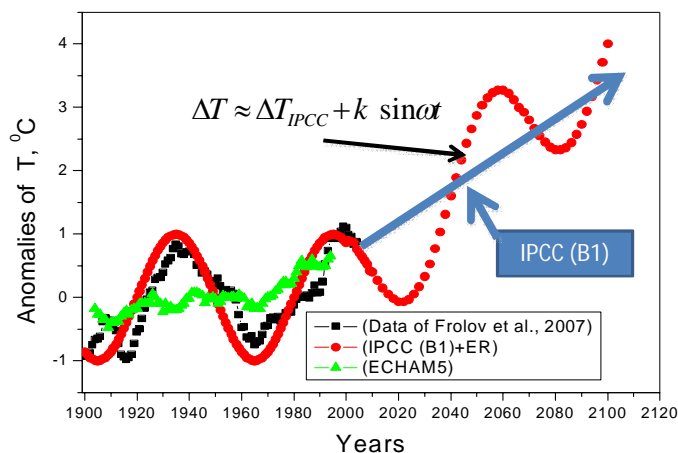


Рис. 7 Результаты моделирования температурных изменений в Арктике (IPCC-B1 - синяя линия) и сценарий, включающий парниковую и циклическую составляющие - красная кривая (Панин, 2009).

С удалением от полюсов амплитуда квазипериодических колебаний уменьшается, и с приближением к тропической зоне данный сценарий изменения температуры практически не будет отличаться от прогноза МГЭИК (IPCC).

КАСПИЙСКОЕ МОРЕ

Многолетние изменения уровня Каспийского моря и составляющих его водного баланса исследуются на основе различных подходов. В большинстве случаев принимается гипотеза о стационарности климата на протяжении последних десятилетий. Используется вероятностная методика, линейные и нелинейные стохастические модели с дискретным и непрерывным временем, модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Так, согласно исследованиям Ратковича (1994) уровень Каспийского моря должен понижаться (рис. 8б). Голицын и др., 1998, используя аналогичный подход к водному балансу в период 1978-1995гг., прогнозируют подъем уровня моря в этот же период (рис.8а). Казанский (1994) прогнозирует еще более интенсивный подъем уровня моря (рис.8в) В то время как данные наблюдений свидетельствуют о некотором другом процессе (рис.8г).

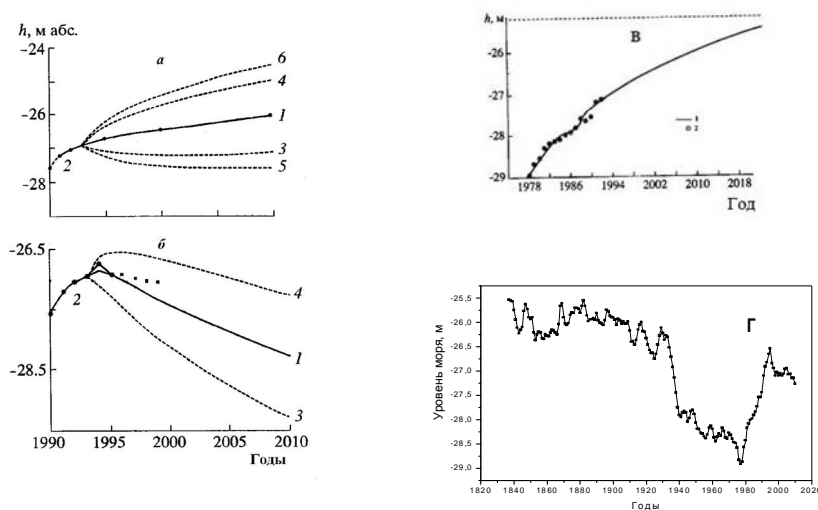


Рис 8. Стохастическое прогнозирование уровня Каспийского моря, (а) - по Голицыну и др., 1998, (б) – по Ратковичу, 1994, (в) – по Казанскому, 1994, (г) - данные наблюдений.

Попытки предвидения уровня Каспия, основанные на работах Будыко (Будыко и др., 1988) с учетом прогноза антропогенных изменений климата, также нельзя признать успешными.

Хубларян и Найденов (1994), учитывая нелинейность системы уравнений водного и теплового баланса, показали, что характер ее решения может меняться, возникают неединственные и неустойчивые решения. Заметим, что Фролов (2003) предлагает результаты расчетов уровня режима Каспийского моря на долгосрочную перспективу (5-20 лет) время от времени пересматривать с учетом фактического положения и тенденции изменения уровня моря и климатических параметров, определяющих формирование водного баланса моря, а также последствий антропогенной деятельности в бассейне моря. Прогноз уровня колебаний при этом приобретает адаптивный характер, учитывающий происходящие и уточняющие перспективные изменения параметров природных и антропогенных процессов, формирующих уровень режим.

Использование моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) на региональном уровне также часто приводит к противоречивым результатам. Например, немецкие ученые Клаус Арпе и Эрик Рокнер (Arpe et al., 1999) совместно с сотрудниками

Института физики атмосферы РАН проанализировав изменения в гидрологическом цикле нескольких бассейнов, включая Каспийское море, отметили увеличение атмосферных осадков и поверхностного стока. Полученные результаты свидетельствуют о подъеме уровня Каспийского моря в XXI в (рис. 9). Несколько позже Лерой и Арпе (Leroy, Arpe, 2007) с использованием трех моделей МОЦАО прогнозировали постоянство уровня моря вплоть до окончания XXI века (рис 9).

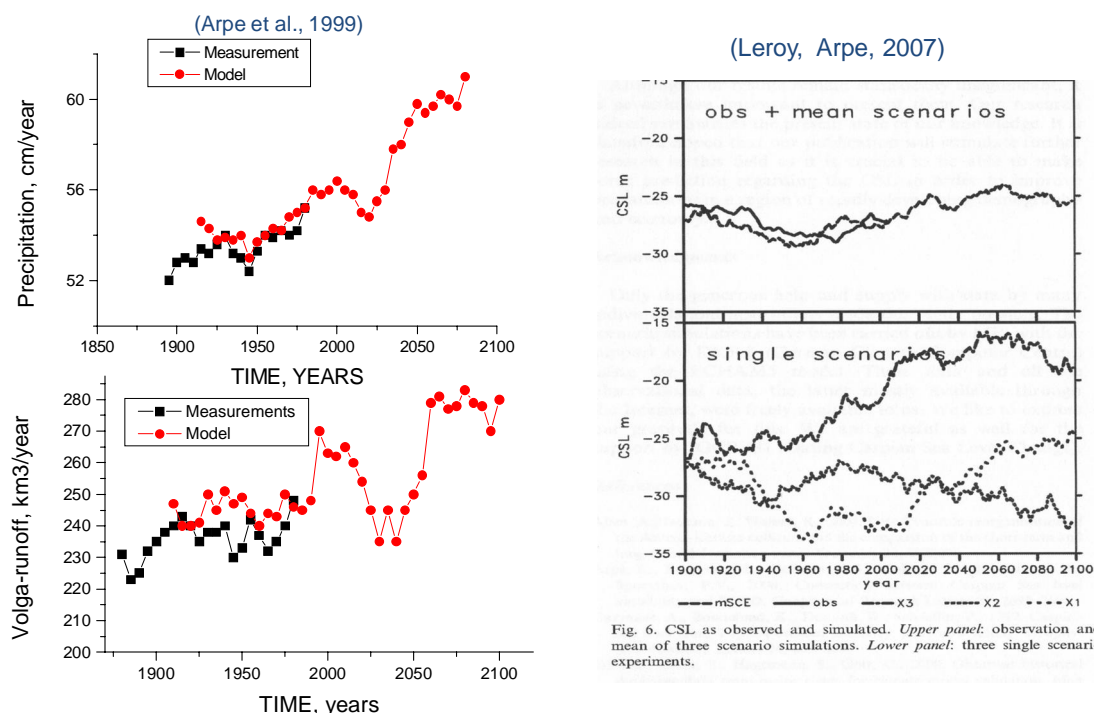


Рис. 9 Прогноз изменения осадков, стока р. Волги и уровня Каспийского моря с помощью (МОЦАО), Arpe et al., 1999 (слева), Leroy, Arpe, 2007 (справа).

Независимые исследования этого региона, выполненные итальянскими исследователями Н. Elguindi и Giorgi (Elguindi, Giorgi, 2006) для разных сценариев (IPCC A2 и A1b) показали, что в течение XXI в. в большинстве моделей, наоборот, ожидается устойчивое снижение уровня Каспийского моря (рис. 10).

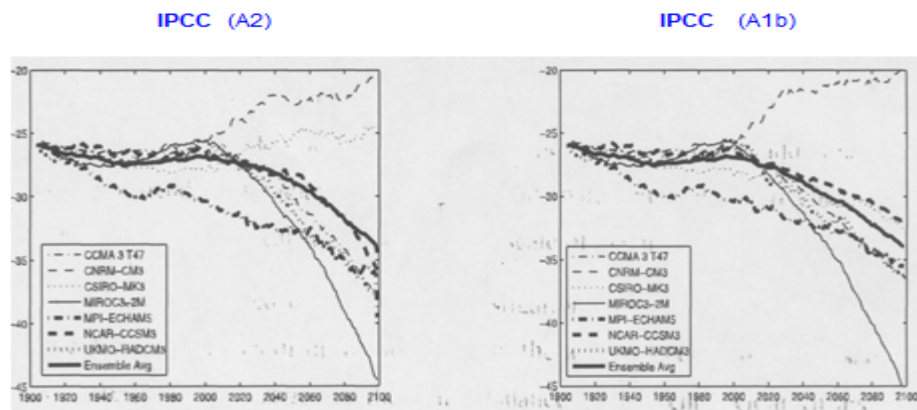


Рис. 10 Прогноз изменения уровня Каспийского моря (IPCC (A2 и A1b)) в XXI веке (Elguindi and Giorgi, 2006)

Предсказанное снижение уровня Каспийского моря противоречит результатам, к которым пришли немецкие ученые. Новые климатические исследования этого региона (Мелешко и др., 2008) с помощью семи моделей (IPCC) показали, что уровень моря в XXI веке не будет значительно изменяться (рис. 4).

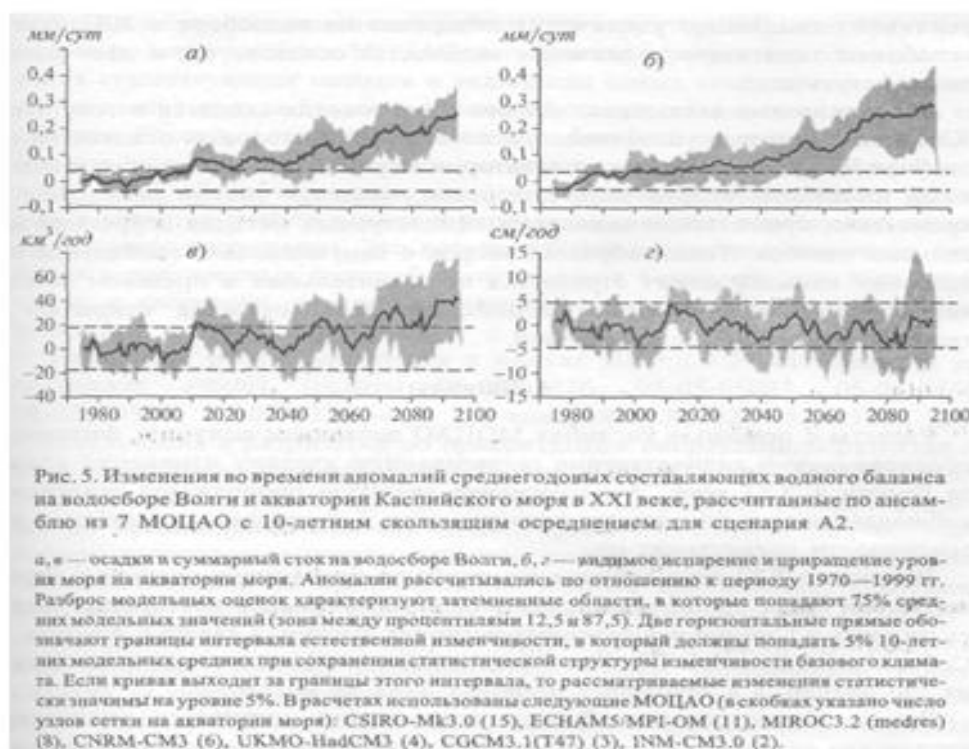


Рис. 11. Прогноз изменения уровня Каспийского моря (МОЦАО) в XXI веке Мелешко и др., 2008.

По-видимому, одна из причин отмеченных противоречий связана с использованием разных параметризаций для испарения (модели, использующие более сильную зависимость испарения от температуры воздуха, приводят к более сильному снижению уровня Каспия). Это обстоятельство указывает, в частности, на необходимость проведения дополнительных исследований испарения, как с водной поверхности, так и с поверхности суши. Эта работа ведется и первые результаты (Panin et al., 2006, Панин и др., 2006, 2009, 2011) свидетельствуют о существенном упущении в исследовании природы взаимодействия водоема с атмосферой.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ИСПАРЕНИЯ, УЧЕТ ЭФФЕКТА МЕЛКОВОДИЙ В ВОДНОМ БАЛАНСЕ МОРЯ.

Проведенный нами анализ методов расчета значений испарения, а также тепло и энергообмена показал, что в современных моделях тепло-массообмена между водоемами и атмосферой не учитываются особенности мелкомасштабного *взаимодействия мелководий с атмосферой*. Волны в мелководных акваториях более крутые, чем в открытых и глубоководных частях морях и раньше (при более низких скоростях ветра) обрушаются. Все это приводит к усилению шероховатости водной поверхности в аэродинамическом смысле и соответственно к более интенсивному турбулентному обмену импульсом, теплом и влагой. Проведенный обзор показал также, что на сегодняшний день вообще нет какого-либо надежного метода определения испарения и теплообмена мелководных озер и прибрежной зоны морей. Влияние увеличения аэродинамической шероховатости поверхности мелководий на интенсификацию испарения E , теплообмена H_T и динамическую скорость U_* представлено в виде (Панин и др., 2006):

$$\begin{aligned} U_*^{SW} &= U_* + U_* \cdot k_U^{SW} \cdot \frac{h}{H} \approx U_* (1 + 1.6h/H) \\ H_T^{SW} &= H_T + H_T \cdot k_T^{SW} \cdot \frac{h}{H} \approx H_T (1 + 2h/H) \\ E^{SW} &= E + E \cdot k_E^{SW} \cdot \frac{h}{H} \approx E (1 + 2h/H) \end{aligned} \quad (2)$$

Где: $k_T^{SW} \approx k_E^{SW} \approx 2.0$, $k_U^{SW} \approx 1.6$ - эмпирические коэффициенты. В (2) h^{SW} - высота волны на мелководье, которую необходимо измерить, H – глубина моря..

Данные относительно h^{sw} часто отсутствуют, поэтому можно воспользоваться эмпирическим соотношением $h^{sw} \approx \frac{0.07 \cdot U_z^2 \cdot (gH / U_z^2)^{3/5}}{g}$.

Величина интенсификации энерго-массообмена мелководных акваторий с атмосферой, полученная на основе эмпирических формул (2) при различных скоростях ветра проиллюстрирована на рис. 12.

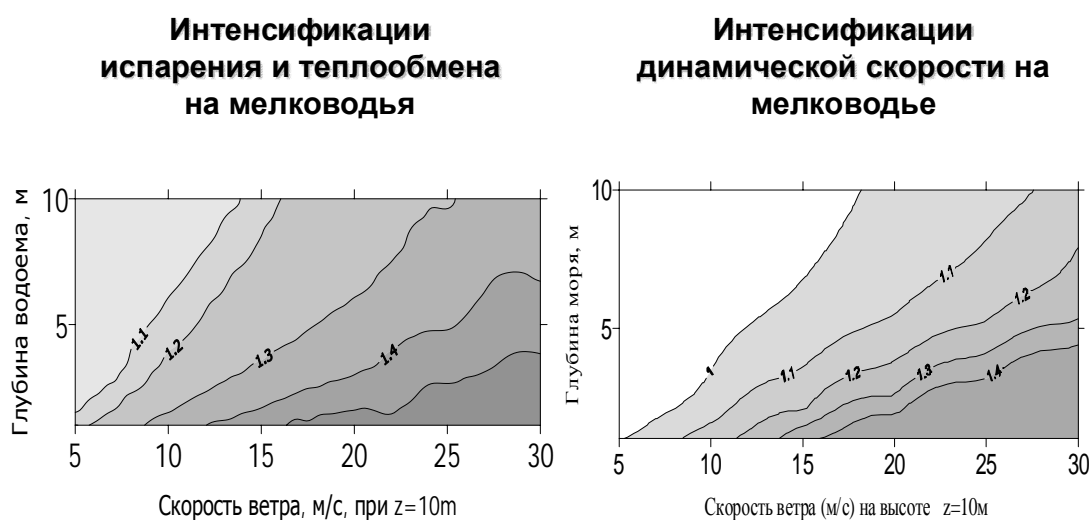


Рис. 12 Интенсификация испарения и теплообмена (слева) и динамической скорости (справа) на мелководье (Панин и др., 2006).

Показано, что сравнение различных параметризаций для вычисления явных и скрытых потоков тепла для открытого моря, скорректированных с учетом эффекта мелкой воды приводит к увеличению потоков, достигающих значений 10-20 %, которые выше чем различия между рассчитанными и измеренными потоками.

Для прибрежной зоны используется понятие зоны прибоя ($x \leq L^{(-)}$), где выполняются условия $(h^{(-)}(x) = H^{(-)}(x) \cdot f(\operatorname{tg} \alpha) \approx 0.5 H^{(-)}(x))$.

На границе прибрежной зоны принято возможным использование дисперсионных соотношений, как для глубокого моря ($C_0 = g / \omega$), так и для мелкого моря ($C_0 = \sqrt{gH}$). С

учетом этого на границе прибрежной зоны можно записывать: $\frac{\lambda^{(+)}}{H^{(+)}} = 2\pi \approx 6.28$.

Уравнение энергетического баланса в прибрежной зоне при $(\frac{\lambda^{(+)}}{H^{(+)}} = 2\pi \approx 6.28)$

использовалось в виде: $\frac{\partial h^2}{\partial x} = \frac{h^{(+2)}}{L^{(+)}} F(\operatorname{tg} \alpha)$ (Панин и др., 2006).

Модель энегообмена между водоемом и атмосферой в прибрежной зоне также хорошо согласуется с экспериментальными данными о коэффициенте сопротивления, измеренного разными авторами (рис. 13)

Верификация модели испарения

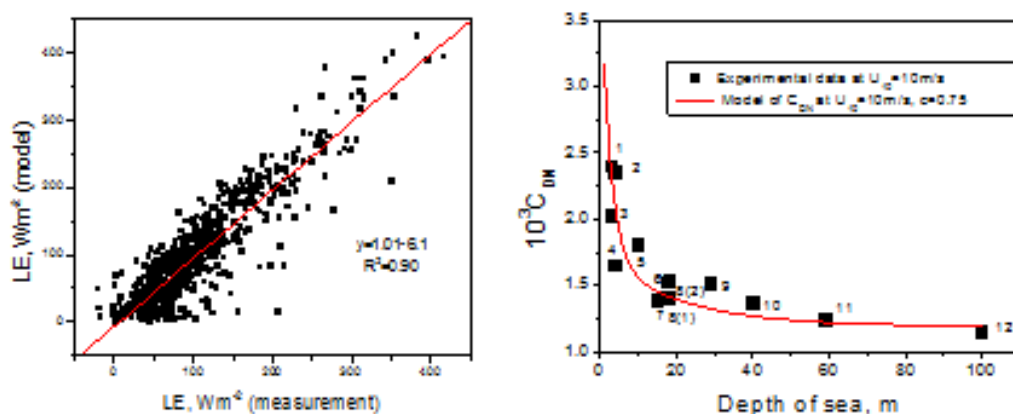


Рис. 13 Верификация модели испарения по данным прямых измерений (слева) и на примере моделирования коэффициента сопротивления (C_{DN}) от глубины моря при скорости ветра $U_{10}=10$ м/с (справа), точки 1-12 – экспериментальные данные.

Полученные результаты свидетельствует о том, что для Каспийского моря, где доступен стандартный набор данных о скорости ветра, воздушной и водной температуре, воздушной влажности и глубине, вполне можно использовать предложенную параметризацию. Полученные результаты (рис. 14, 15) наглядно свидетельствуют о хорошем согласовании поля испарения с батиметрией моря.

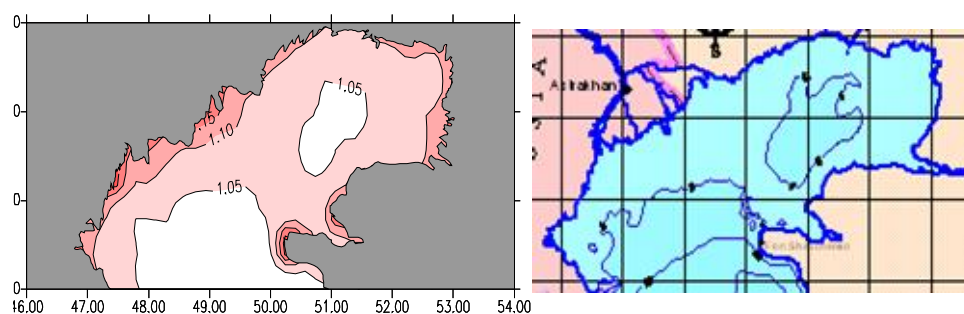


Рис 14 Результаты расчета интенсификации испарения Северного Каспия при 10 м/с (слева коэффициент интенсификации испарения на мелководье, справа батиметрия).

Батиметрия Каспийского моря и испарение с моря

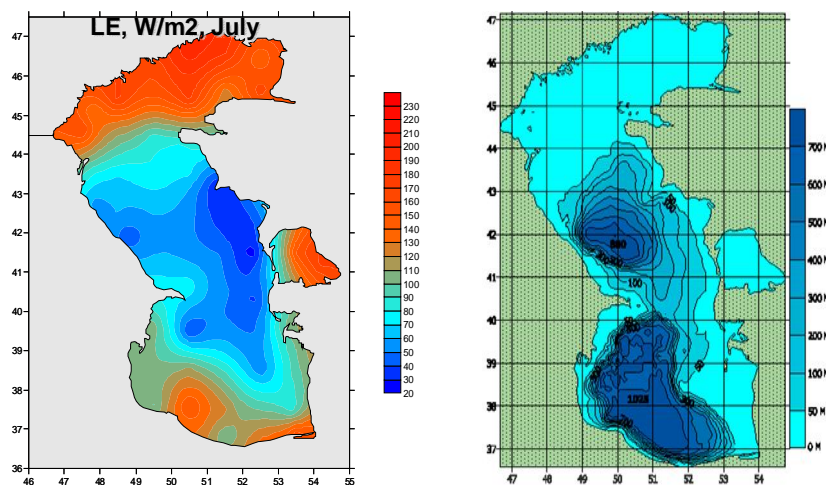


Рис 15 Распределение среднееголетних (за период с 1904 по 1987гг.) значений скрытой теплоты по акватории Каспийского моря в июле с учетом интенсификации вертикального обмена за счет глубины (слева) и батиметрия моря (справа).

В целом, наши теоретические обобщения и экспериментальные исследования роли глубины водоема в интенсификации испарения, теплообмена и трения водной

поверхности, а также первые оценки этого эффекта в испарении Северного Каспия убедительно иллюстрируют универсальность новой модели. Приведенные результаты свидетельствуют, с одной стороны, о значительном влиянии глубины водоема на интенсивность энергообмена в естественных условиях. С другой стороны, приведенные примеры иллюстрируют хорошее согласование модельных расчетов с экспериментальными данными. В реальных условиях, с использованием непосредственных данных о глубине, площади и повторяемости скорости ветра, учет эффекта мелководий приводит к увеличению результирующей величины испарения с поверхности Северного Каспия более чем на 10%, что явно неучитывалось ранее в водном балансе моря.

Наряду с этим следует отметить и недостаточную изученность связи региональных изменений составляющих водного баланса Каспия с глобальными процессами и прежде всего с динамикой Северной Атлантики. Исследование это представляется особенно важным, т.к. до сих пор нет единого мнения в отношении изменении уровня Каспийского моря. Нет возможности даже с уверенностью сказать о том, какие будут тенденции изменения его уровня.

СВЯЗЬ КЛИМАТА КАСПИЙСКОГО МОРЯ С ПРОЦЕССАМИ ГЛОБАЛЬНОГО ХАРАКТЕРА.

Покажем, как изменчивость региональных гидрометеорологических характеристик может быть связана с глобальными климатическими изменениями. Запишем систему двух уравнений

$$dh / dt = RF/S(h) + P_L - E_L + GF/S(h), \quad (3)$$

$$dW / dt + AF_1 - AF_2 \approx P - E \quad (4)$$

Уравнение (3) характеризует водный баланс замкнутого водоема. Уравнение (4) характеризует баланс влаги над регионом, включающим водоем и его бассейн. Здесь RF - речной сток, GF - подземный сток, $S(h)$ – площадь зеркала моря при определенном уровне моря h , W - влагосодержание атмосферы над регионом, AF_1 , AF_2 – горизонтальные потоки влаги, P и E атмосферные осадки и испарение соответственно. В уравнениях (3 и 4) и далее индекс L указывает на принадлежность к морю, а индекс S – на принадлежность к водосборной территории.

В случае Каспийского моря, $GF/S(h) \approx (0.01-0.02)E_L$. Учитывая также, что речной сток определяется в основном разностью осадков и испарения на водосборе $RF/S(h) = \varphi(P_C - E_C)$, уравнение (1) можем переписать в виде:

$$dh/dt = \varphi(P_C - E_C) + P_L - E_L \approx P_C - E_C + P_L - E_L. \quad (5)$$

При $P = P_C + P_L$; $E = E_C + E_L$ уравнение (3) перепишем в виде

$$dh/dt \approx P - E \quad (6)$$

Из (6) следует, что изменение уровня Каспийского моря связано, главным образом, с изменением атмосферных осадков и испарения.

Сравнивая уравнения (4) и (6) получаем, что изменение уровня водоема может быть определено в виде:

$$dh/dt \approx dW/dt + AF_1 - AF_2 \quad (7)$$

Из (6), в частности, следует, что изменение уровня моря а, соответственно, и изменение атмосферных осадков и испарения существенным образом зависит от горизонтального переноса воздушных масс, направления их переноса (то есть от направления и скорости ветра).

Анализ, выполненный Голицыным и др. (1990), в сочетании с обнаруженным трендом модуля скорости ветра, позволил выявить определенные различия в многолетних тенденциях скорости ветра в зависимости от его направления в районе Каспийского моря. Эти изменения в скорости ветра оказались настолько существенны, что учитывать их для описания водного баланса Каспийского моря оказалось не менее важным, чем температурные изменения в этот же период (Панин и др., 2005). Известно, что определенные представления об изменении циркуляционных атмосферных процессов здесь дает анализ индекса Североатлантического колебания. В связи с этим проанализируем взаимосвязи процессов, происходящих в окрестности Каспийского моря (на водосборной его территории) с особенностями атмосферной циркуляции, характеризуемой индексом САК (рис. 16).

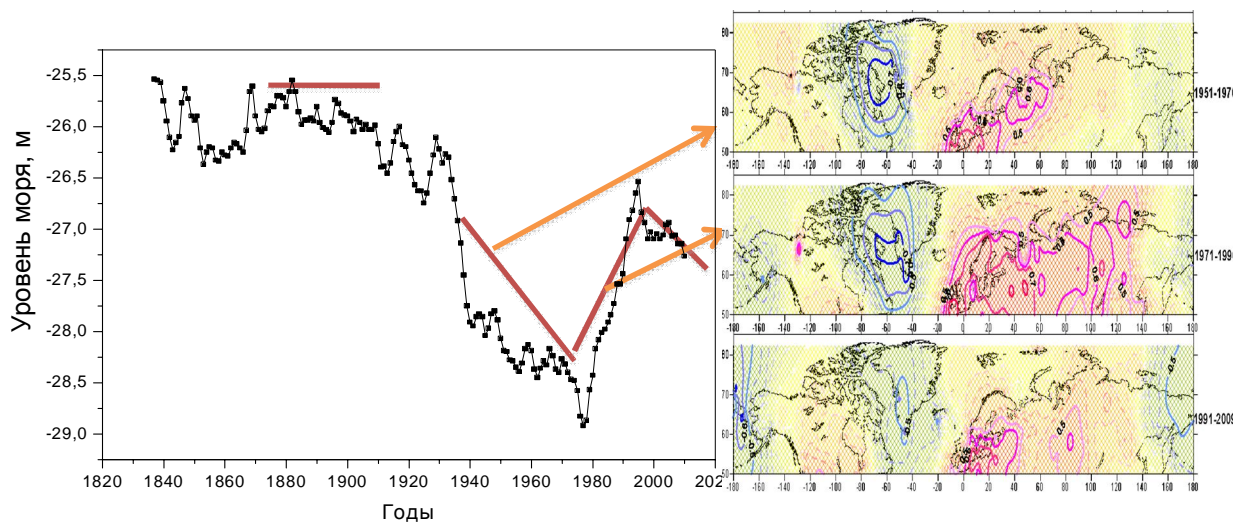


Рис. 16. Корреляции между зимними значениями температуры воздуха в северном полушарии и зимними значениями индекса САК (осредненными за периоды 1951-1970 гг., 1971-1990 гг., 1991-2009 гг.) при разных тенденциях в изменении уровня Каспийского моря. Линиями показаны тенденции в изменении уровня моря, изолиниями показаны зоны распространения воздействия САК на территорию Евразии, стрелками показана согласованность зон распространения САК и изменения уровня моря.

Рисунок 16 иллюстрирует согласованность изменения уровня моря с изменениями зон влияния индекса САК на Евразию. Хорошо видно, что период снижения уровня моря (1940-1977 и 1996-2012 гг.) приходится на период пониженного влияния САК (корреляция между зимними значениями температуры воздуха и зимними значениями индекса САК минимальная) на Евразию и, в частности на водосборную территорию Каспийского моря. В тоже время период роста уровня моря приходится на период повышенного влияния САК (корреляция между зимними значениями температуры воздуха и зимними значениями индекса САК максимальная).

Взаимный анализ изменчивости атмосферных осадков в бассейне Каспийского моря с индексом САК показал, что и осадки в бассейне Каспийского моря существенным образом зависят от Атлантики (рис. 17). Из рисунка 17 хорошо видно, что на период снижения уровня моря приходится отрицательная корреляция полей осадков с САК, подъем уровня совпадает с положительной корреляцией полей осадков с САК. Оценка

трендов в изменении осадков для рассматриваемых периодов также свидетельствует о согласованности в изменениях САК, атмосферных осадков (тренд осадков составил -16.2 мм/10 лет в период падения уровня Каспия и +1.5 мм/10 лет в период его подъема) и уровня Каспийского моря.

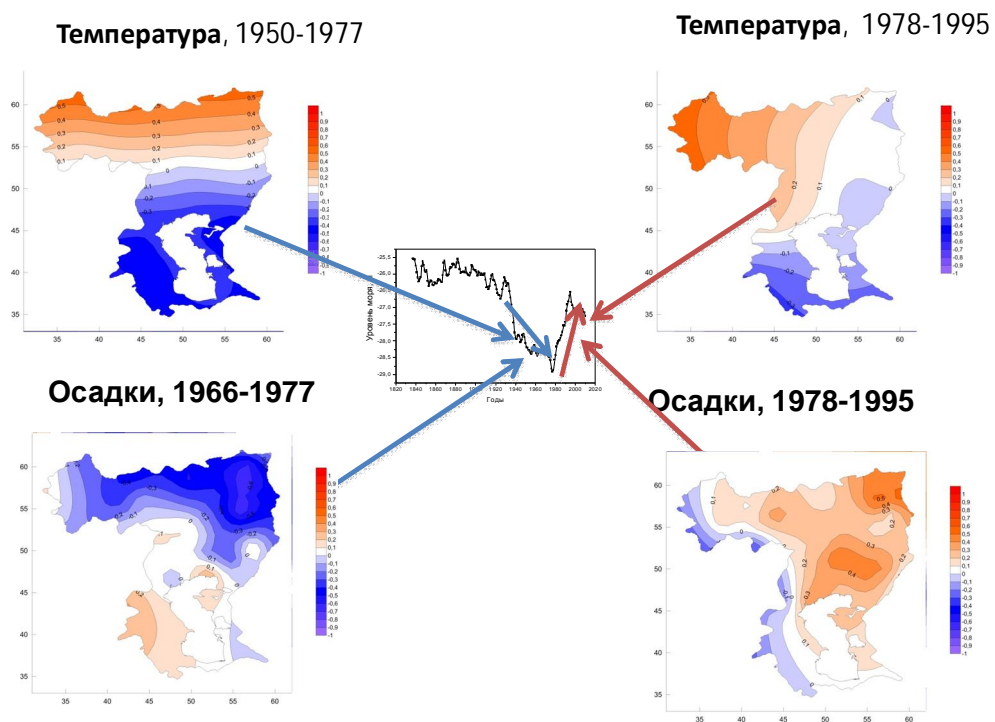


Рис. 17 Корреляция между годовыми значениями температуры и осадков в бассейне Каспийского моря с годовыми значениями САК при разных стадиях изменения уровня Каспийского моря.

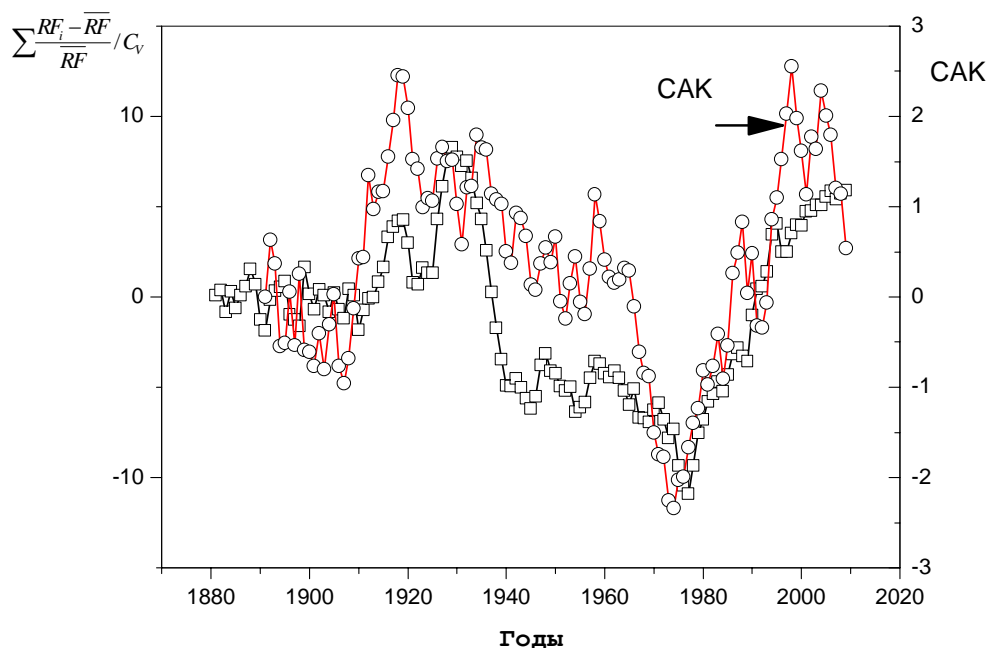


Рис. 18. Изменчивость интегрального нормированного стока р. Волги $\sum \frac{RF_i - \overline{RF}}{\overline{RF}} / C_v$ и САК (со сдвигом 10 лет).

Согласованность в тенденциях хода уровня Каспийского моря с САК и стока Волги с САК (рис. 16 - 18) и вероятная согласованность САК с индексами АТХЦ и МПТ (эти связи еще предстоит проверить) должны свидетельствовать о непосредственном влиянии последних на вариации климата Евразии, а соответственно и ход уровня моря.

Все это напоминает некоторый согласованный циклический процесс в колебаниях САК и уровня моря. Очевидно, что для того, чтобы предсказать изменения уровня моря важно рассматривать не только динамическое и температурное локальное влияние, но также и особенности изменчивости Северной Атлантики и Арктики, движение воздушных масс (смены направления и скорость приземного ветра).

Выше уже исследовались циклические особенности климатических изменений полярных зон и предложен сценарий возможных климатических вариаций полярных зон в XXI столетии, базирующийся на композиции «парникового» и «циклического» эффектов.

С удалением от полюсов амплитуда квазипериодических колебаний уменьшается, и с приближением к тропической зоне прогноз изменения температуры практически не будет отличаться от прогноза МГЭИК. Каспийское море и его водосбор находятся в умеренных широтах и поэтому «циклический» эффект здесь может быть еще значительным и подобный сценарий может оказаться вероятным также и для Каспийского моря. Фактически это означает, что прогнозы изменений климата Каспийского региона (включая прогноз уровня моря) в XXI столетии с помощью численных моделей общей циркуляции атмосферы и океана могут быть скорректированы, если учесть циклические

особенности изменения климатической системы и, в первую очередь, циклические особенности климата Северной Атлантики.

То, в какой мере океан, и, в частности, Атлантический океан испытывают те или иные колебания исследуются в последнее время очень активно (Володин, Дианский, 2006, Мохов и др., 2008, Gulev, Belyaev, 2012). Далее сделана попытка воспроизвести основные колебания Атлантического океана и проследить их влияние на Каспийское море (Панин, Дианский, Изв. РАН, ФАО, в печати).

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЮ ЦИРКУЛЯЦИИ МИРОВОГО ОКЕАНА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ.

Важным этапом этого исследования является воспроизведение циркуляции Мирового океана с помощью МОЦО для оценки климатической изменчивости характеристик АТХЦ, которая формирует меридиональный перенос тепла в высокие широты северного полушария и тем самым воздействует на климат Евразии.

Здесь приведены результаты, полученные при воспроизведении циркуляции Мирового океана с помощью МОЦО INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model). Модель INMOM разработана в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН и относится к классу σ -моделей океана.

Сценарий эксперимента был взят в соответствии с международной программой CORE II (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments) по воспроизведению циркуляции Мирового океана. Согласно этому сценарию, эксперименты стартовали с климатологии Левитуса и по времени осуществлялось интегрирование на пять 60 летних циклов, соответствующих периоду с 1948 по 2007 гг.

Для расчета атмосферного воздействия использовалась специальная база CORE приводных атмосферных характеристик, в основе которой лежат данные реанализа NCEP/NCAR. Атмосферные характеристики CORE включают в себя глобальные поля следующих величин: температура воздуха, влажность и скорость ветра на высоте 10 м и атмосферное давление на уровне моря – все величины с временным интервалом 6ч; падающие длинноволновая и коротковолновая радиации (временной интервал – сутки); среднемесячные атмосферные осадки и сток рек.

Пространственное разрешение полей названных атмосферных характеристик в CORE составляет по долготе 1.875° . По широте разрешение неравномерное. У экватора оно составляет 1.9048° , и улучшается к полюсам до 1.8888° . Расчёт потоков тепла, соли и момента на поверхности океана осуществлялся согласно хорошо известным балк-формулам.

Чтобы проверить, как воспроизводится межгодовая изменчивость циркуляции океана, были проведено сравнение временного хода Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) из модельных расчетов и данных наблюдений.

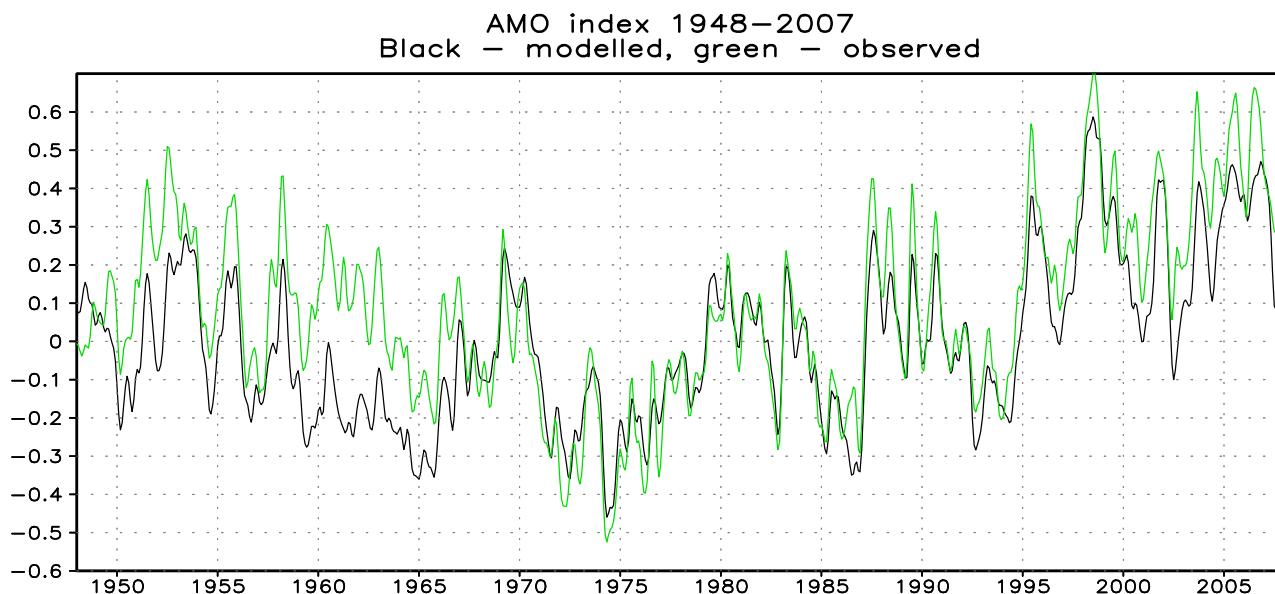


Рис. 19. Среднегодовой индекс Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО) за 1948 – 2007 гг., °C, по данным наблюдений <http://www.cdc.noaa.gov/Correlation/amon.us.long.data> (зеленая кривая), и по результатам модельных расчетов по INMOM (черная кривая).

На рис. 19 показан временной ход среднегодового индекса АМО за 1948 – 2007 гг. по данным наблюдений <http://www.cdc.noaa.gov/Correlation/amon.us.long.data> и по результатам модельных расчетов по INMOM. Рис. 4 показывает хорошее совпадение модельного и наблюдаемого индекса АМО. Некоторое рассогласование в первые 10 лет расчета показывает, что за этот период модель океана приспосабливается к реалистичному атмосферному форсингу CORE. Дело в том, что вначале модель «разгонялась» в течение 60 лет модельного времени со среднеклиматическим атмосферным воздействием без межгодовой изменчивости.

Таким образом, показано, что модель успешно воспроизводит процесс АМО, который является не только следствием атмосферного воздействия, но и собственных колебаний океана. И главным фактором такой изменчивости океана является изменчивость его термохалинной циркуляции, которая представляет собой крупномасштабный меридиональный круговорот воды в Северной Атлантике и, в целом, формирует меридиональный перенос тепла (МПТ) в высокие широты северного полушария.

На рис. 20 показаны временной ход индекса АТХЦ и суммарного МПТ в области от 30°N до 60°N в атлантическом секторе. Здесь в качестве индекса АТХЦ выбиралась величина максимума функции тока зонально интегрированной по акватории Северной Атлантики меридиональной циркуляции (в координатах широта-глубина). Таким образом, индекс АТХЦ характеризует ее интенсивность. Следует отметить, что величина индекса

АТХЦ колеблется от 17 до 23.5 Св, составляя в среднем 20.5 Св, что хорошо согласуется с оценками по данным наблюдений и зарубежными модельными расчетами

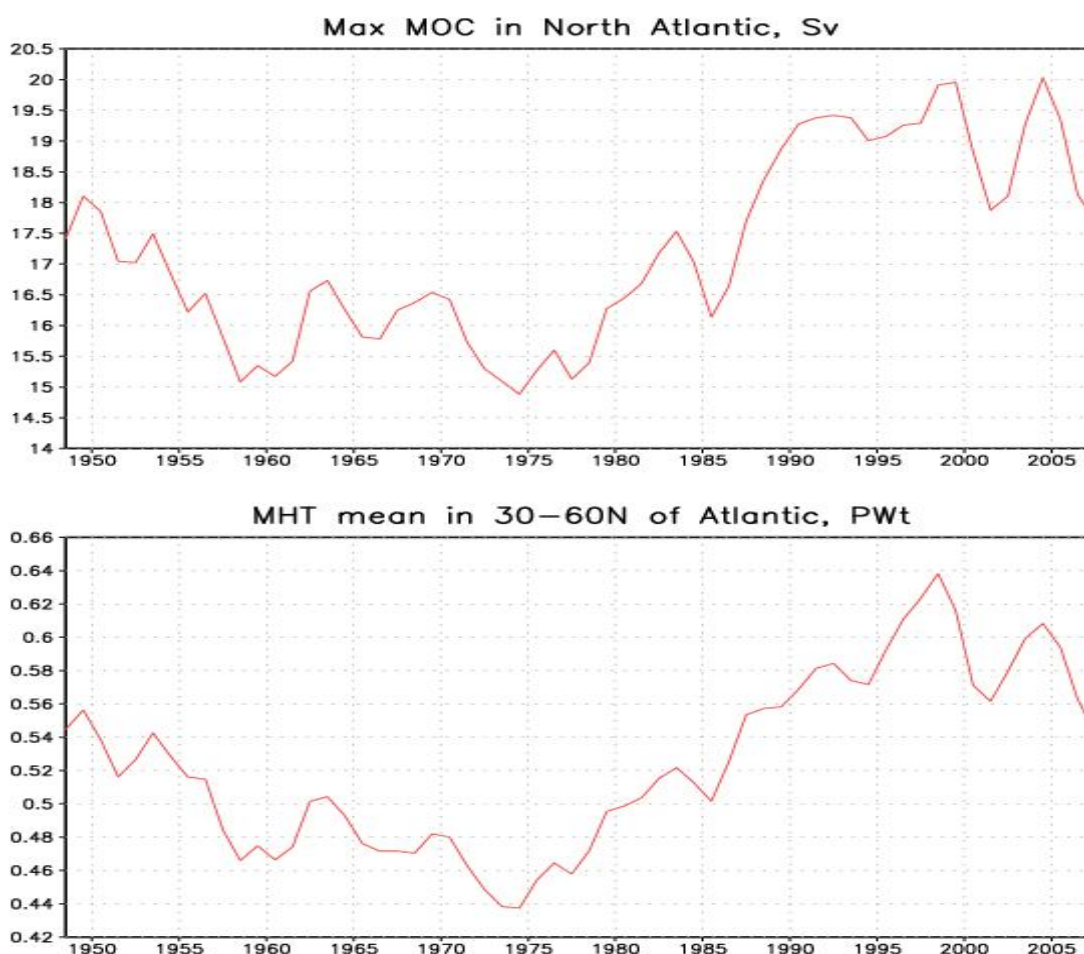


Рис. 20. Временная эволюция среднегодового максимума меридиональной функции тока (Св, сверху) и меридионального переноса тепла, среднего в полосе 30-60°N (ПВт, внизу) в Северной Атлантике.

Интенсивность АТХЦ (рис. 20) характеризуется значительными долгопериодными колебаниями, сопровождаемыми аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике (Latif et al., 2004). Этот процесс может определять связь между долгопериодной изменчивостью АТХЦ и климатическими режимами в Евразии и Арктике (Mokhov et al., 2006).

На рис. 20 с конца 1990-х гг. заметно падение интенсивности АТХЦ, которое проявляется также и для эволюции МПТ. Такое падение этих величин согласуется с ростом температуры поверхности океана (ТПО) в эти годы, проявляющимся в росте индекса АМО. Это, в свою очередь, может существенно сказаться на региональных особенностях климата высоких и средних широт северного полушария, в частности

европейского климата и ледового режима западной Арктики. Заметим, что изменчивость АТХЦ (рост ее активности в последние десятилетия XX века) может свидетельствовать о причинах стремительного потепления в западном секторе Арктики. Начавшееся снижение активности АТХЦ в начале XXI века может свидетельствовать о грядущем похолодании в западной Арктике, что, в частности, отмечается в отдельных публикациях.

Согласованность в тенденциях хода уровня Каспийского моря с САК (рис. 16) и САК с индексами АТХЦ и МПТ (рис. 21) для всего периода эксперимента (1948–2007 гг.) указывает на важность учета вариаций САК, АТХЦ и МПТ при диагнозе и прогнозе уровня режима Каспийского моря.

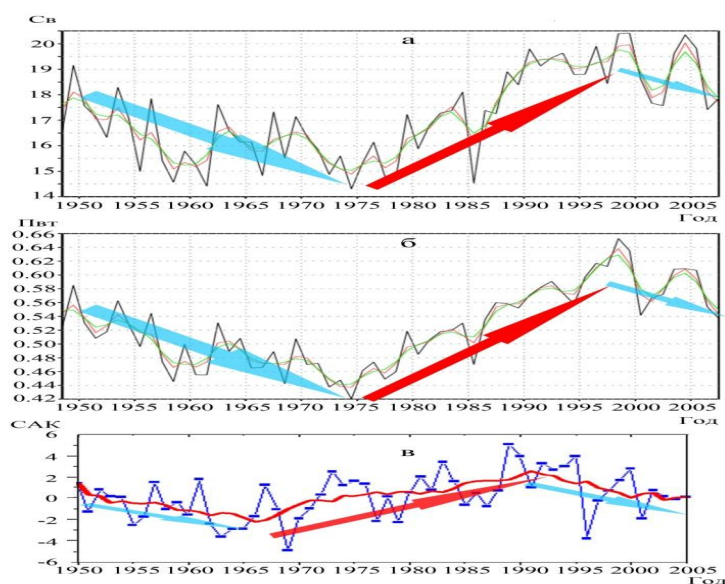


Рис. 21. Тенденции долгопериодных изменений термохалинной циркуляции АТХЦ и МПТ по результатам модельных расчетов по INMOM в области от 30°N до 60°N в атлантическом секторе за периоды 1948-2007 гг. и САК.

Изменения тенденций индекса САК и уровня Каспийского моря, за весь периоды наблюдений свидетельствует о непосредственном влиянии последних на вариации уровня моря (рис. 22).

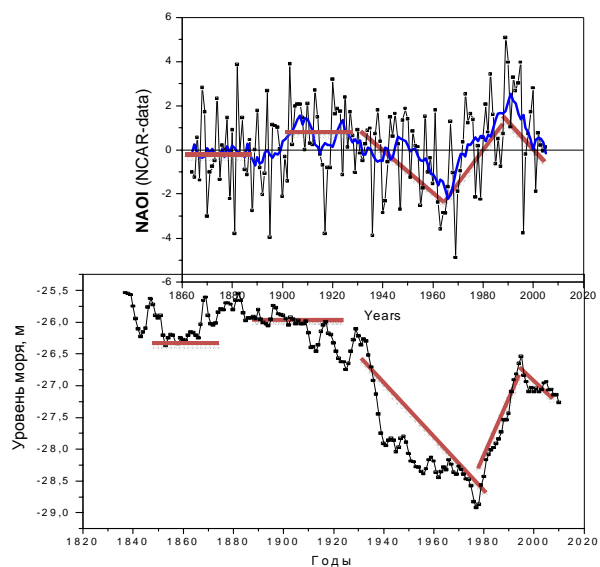


Рис. 22. Изменения тенденций индекса САК и уровня Каспийского моря, за весь периоды наблюдений.

Корреляции между зимними значениями температуры воздуха и зимними значениями индекса САК и зоны их распространения при разных тенденциях в изменении индексов АТХЦ и МПТ (рис. 23) и связь между эволюцией уровня Каспийского моря и вариацией индексов АТХЦ и МПТ (рис. 24) свидетельствуют и о непосредственном влиянии последних на вариации климата Евразии, ход уровня Каспийского моря.

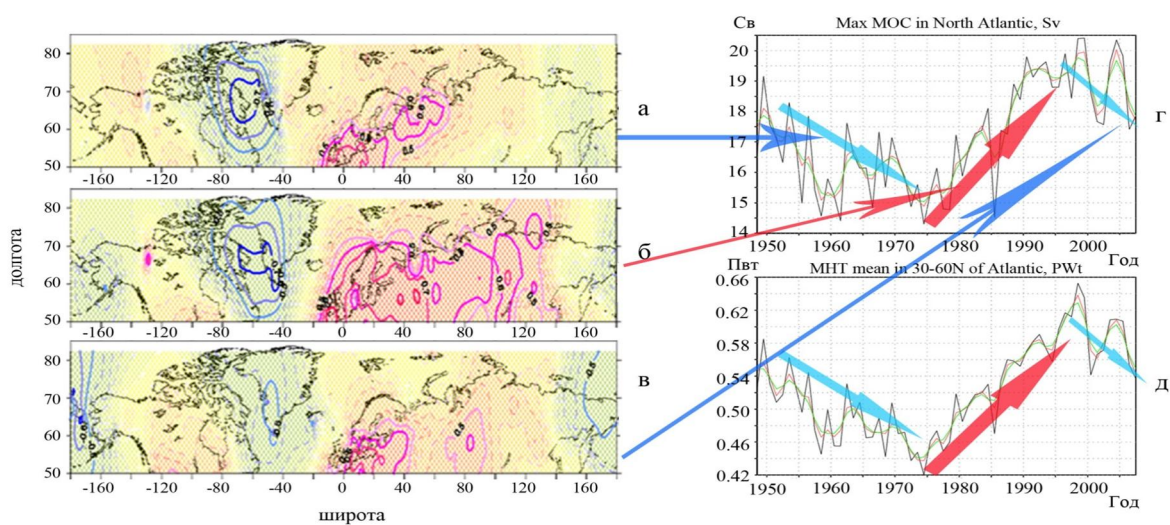


Рис. 23. Связи между зимними значениями температуры воздуха в Северном полушарии и

САК, за периоды (а - 1951-1970 гг., б - 1971-1990 гг., в - 1991-2009 гг.) и вариации термохалинной циркуляцией и меридионального переноса тепла по результатам модельных расчетов по INMOM в области от 30°N до 60°N в атлантическом секторе за периоды 1948-2007 гг.

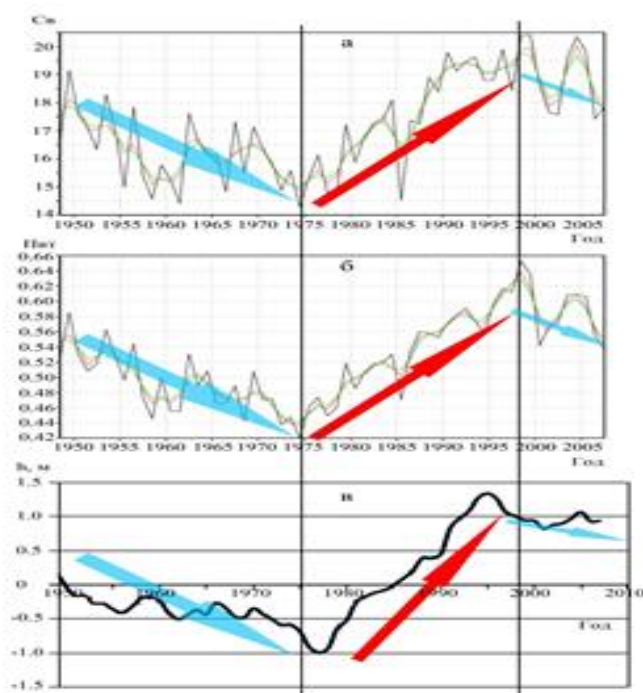


Рис.24. Связи между эволюцией уровня Каспийского моря и индексами АТХЦ и МПТ по результатам модельных расчетов по INMOM в области от 30°N до 60°N в атлантическом секторе за периоды 1948-2007 гг. (Панин, Дианский, в печати).

Следует заметить, что изменения тенденций индекса САК происходят с опережением основных тенденций в уровне Каспия приблизительно на десять лет (рис. 21) и поэтому имеют определенный прогностический эффект. Индекс САК, как известно, отражает динамику разностей атмосферных давлений между Азорским максимумом и Исландским минимум, но при этом никак не учитываются вариации влаги в атмосфере. Однако, именно количество влаги, выносимое с Атлантики на Евразию, ее вариации могут оказаться наиболее важными для интерпретации гидрологического режима последней. Очевидно, что влияние Атлантики на изменение уровня Каспийского моря осуществляется в конечном итоге за счет переноса влаги с акватории Северной Атлантики в регион водосбора Каспийского моря. Это количество переносимой влаги со всей очевидностью должно быть в прямой зависимости как от количества самой влаги над Северной Атлантикой, так и от скорости ее переноса. Исходя из этого, можно построить сводный индекс такого процесса, где количество влаги можно оценить по влажности над Северной Атлантикой, а скорость ее западного переноса характеризовать с помощью индекса САК. Такой индекс был построен Н. Дианским по данным CORE. На рис. 24 показаны среднегодовые обезразмеренные временные эволюции за период 1948-2007 гг. для САК и средней влажности на уровне 10 м в

Северной Атлантике в поясе 30° – 60° N. Обезразмеривание осуществлялось путем вычитания средних величин и нормировки полученных аномалий на их СКО.

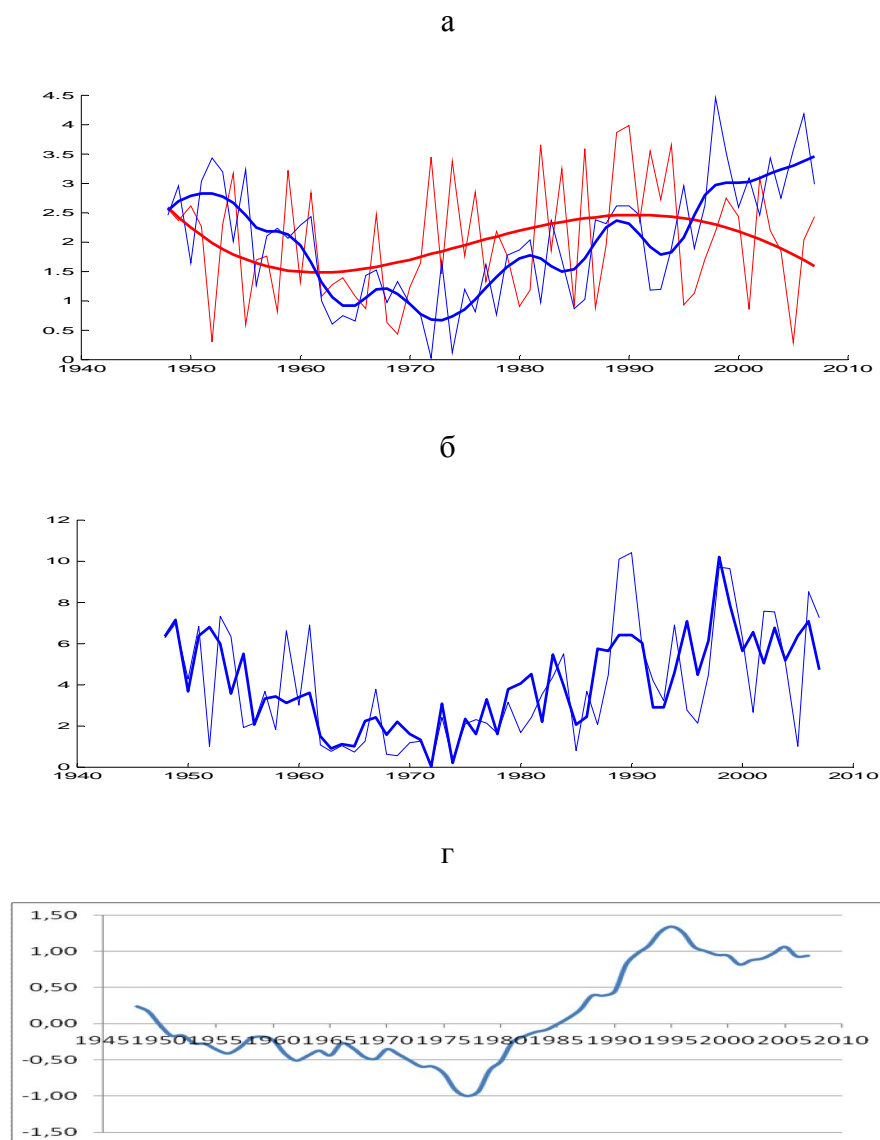


Рис. 25. Среднегодовые обезразмеренные временные эволюции за период 1948-2007 гг. для САК (показаны красным цветом) и средней влажности на уровне 10 м в Северной Атлантике в поясе 30° – 60° N (показаны синим цветом) (а). Сводный индекс переноса влаги с акватории Северной Атлантики за этот же период (б). Ход уровня Каспийского моря за этот же период (г). Более жирные кривые на (а) и (б) соответствуют фильтрованным величинам.

Из рис. 25 видно, что изменение сводного индекса переноса влаги с акватории Северной Атлантики за период эксперимента (1948-2007 гг) согласуется с ходом уровня Каспийского моря опережая последний приблизительно на 5 лет. Следует отметить, что

предложенный сводный индекс переноса влаги характеризует горизонтальный транспорт влаги (см. уравнения 3 и 7) и может использоваться для оценки ее вклада в водном балансе Каспийского моря. Важно, что этот индекс согласуется с индексами АТХЦ и МПТ, то есть отражает вклад термохалинной динамики Атлантики. Заметим, что АТХЦ и МПТ также как и индекс АМО имеют определенные периодические колебания, воспроизведенные по результатам модельных расчетов по INMOM в области от 30°N до 60°N в атлантическом секторе. Это позволяет рассматривать отмеченные результаты как шаг к раскрытию природы колебания уровня моря, а предложенный сводный индекс переноса влаги напрямую может учитываться при прогнозировании гидрологического режима Каспия.

По крайней мере, данные показывают, что абсолютный минимум в уровне Каспийского моря соответствует с запаздыванием приблизительно в 5 лет минимуму индекса переноса влаги и минимуму индексов АМО, АТХЦ (рис. 24). Максимум уровня Каспийского моря, соответствующий 1995 г. хорошо проявляется в продолжительном – порядка 10 лет с 1985 по 1995 гг. – локальном максимуме сводного индекса транспорта влаги над Северной Атлантикой. Локальный максимум уровня моря в 2005 г. опять же с приблизительно 5 летним запаздыванием соответствует локальному максимуму сводного индекса вблизи 2000 г.

Все эти факты представляются важными, так как позволяют рассматривать используемые здесь индексы атмосферной и океанской циркуляции в качестве предикторов для прогнозирования уровня моря на ближайшую перспективу.

ВЫВОДЫ

То, в какой мере предложенные механизмы в те или иные времена оказывают влияние на климатические изменения должно быть предметом дальнейших углубленных исследований.

В настоящей работе развивается новый подход к описанию возможных региональных климатических изменений, базирующийся на композиции “парникового” и “циклического” эффектов.

В результате анализа данных наблюдений в Арктике, Антарктиде и в Северной Атлантике предложен сценарий климатических изменений, представляющий собой сценарий IPCC, усложненный квазипериодическими изменениями с периодом ~60 лет.

Этот сценарий позволяет дать объяснение не только роста температуры, вызванного эмиссией парниковых газов, но и изменчивости климата (в частности наблюдавшееся похолодание в 1940-1970-х годах). В целом можно констатировать, что привлечение информации об циклических изменениях процессов на Земле открывает дополнительную возможность для понимания природы климатических изменений.

По результатам модельных расчетов по INMOM в области от 30°N до 60°N в атлантическом секторе показано, что АТХЦ и МПТ также как и индекс АМО имеют определенные периодические колебания. Это позволяет рассматривать отмеченные результаты как шаг к прогнозированию гидрологического режима Атлантики. По крайней мере, изменчивость АТХЦ (рост ее активности в последние десятилетия XX века) может свидетельствовать о причинах стремительного потепления в западном секторе Арктики (эти изменения, по-видимому, привели и к увеличению продолжительности навигационного периода северного морского пути в Арктике). Начавшееся снижение активности АТХЦ в начале XXI века может свидетельствовать о грядущем похолодании в западной Арктике, что, в частности, позволяет предположить, что период активного использования Северного морского пути, связанного с потеплением заканчивается.

Результаты эксперимента по воспроизведению циркуляции Мирового океана и параметризация циклических особенностей климата позволили выявить их влияние на формирование климатической изменчивости Евразии и уровенный режим Каспийского моря. Это влияние изучалось через изменчивость АТХЦ, которая, в целом, формирует меридиональный перенос тепла в высокие широты северного полушария, индекс САК и индекс транспорта влаги, предложенный в результате исследований.

В результате исследований выявлены связи изменений климата в регионе Каспийского моря и его уровня с процессами глобального характера, которые в данном случае могут быть описаны индексами атмосферной и океанической циркуляции. Согласованность в тенденциях хода уровня Каспийского моря с САК и с индексами АТХЦ и МПТ свидетельствует о непосредственном влиянии последних на вариации климата Евразии, а соответственно и ход уровня моря. Корреляции между зимними значениями температуры воздуха и зимними значениями индекса САК и зоны их распространения при разных тенденциях в изменении индексов АТХЦ и МПТ подтверждают это.

Все это позволяет констатировать, что для того, чтобы предсказать изменения уровня Каспийского моря важно рассматривать не только динамическое и температурное локальное влияние, но также и особенности изменчивости Северной Атлантики и Арктики, движение воздушных масс (смены направления и скорость приземного ветра). Показано, что согласованные процессы в Северной Атлантике и Каспийском море имеют и определенную циклическую составляющую.

Известно, что, с удалением от полюсов амплитуда квазипериодических колебаний уменьшается, но бассейн Каспийского моря находится в умеренных широтах, «циклический» эффект здесь может быть еще значительным, и поэтому подобный сценарий, базирующийся на композиции «парникового» и «циклического» эффектов может оказаться вероятным также и для Каспийского моря. Фактически это означает, что прогнозы изменений климата Каспийского региона (включая прогноз уровня моря) в XXI столетии с помощью численных моделей общей циркуляции атмосферы и океана могут быть скорректированы, если учесть циклические особенности изменения климатической системы и, в первую очередь, циклические особенности климата Северной Атлантики.

Исследования эти представляются особенно важным, т.к. до сих пор нет единого мнения в отношении изменении уровня Каспийского моря. Нет возможности даже с уверенностью сказать о том, какие будут тенденции изменения его уровня.

При исследовании испарения Каспийского моря также получены новые результаты. Предложен новый метод расчета значений испарения, а также тепло и энергообмена между водоемами и атмосферой учитывающий особенности мелкомасштабного взаимодействия мелководий с атмосферой. Наши теоретические обобщения и экспериментальные исследования роли глубины водоема в интенсификации испарения, теплообмена и трения водной поверхности, а также первые оценки этого эффекта в испарении Северного Каспия убедительно иллюстрируют важность привлечение новой модели. В реальных условиях, с использованием непосредственных данных о глубине, площади и повторяемости скорости ветра, учет эффекта мелководий приводит к увеличению результирующей величины испарения с поверхности Северного Каспия более чем на 10%, что явно не учитывалось ранее в водном балансе моря.

Благодарности. Автор выражает благодарности Дианскому Н.А., Выручалкиной Т.Ю. и Соломоновой И.В. за помощь в подготовке рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин Е.М., Дианский Н.А. Моделирование изменений климата в XX-XXII столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 291-306.
2. Израэль Ю. А., Прогнозирование антропогенных воздействий на климат в условиях реализации Киотского протокола. 2006– В мире науки, N10, с.8-11.
3. Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В.. Изменения климата на территории России: температура воздуха и атмосферные осадки. В кн. Изменение окружающей среды и климата, 2008. том. 6, С. 11-23.
4. Семенов В. А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике. Доклады РАН, 2008: 418, №1, 106-109.
5. Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М: Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия. Изв. РАН Физика атмосферы и океана, 2012, т. 48, №4, с. 403-421.
6. Семенов В.А. колебания земного климата, вызванные обратными связями в системе атмосфера – полярные льды – океан, 2012, <http://www.igce.ru/category/seminar>.
7. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Латиф М., Рекнер Э. Связь аномалий климата Евразии и Северной Атлантики с естественными вариациями Атлантической термохалинной циркуляции по долгопериодным модельным расчетам //Доклады АН. 2008. Т.419. No.5. С.687-690.
8. Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю.. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария. Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 6. С. 743-756.

9. Бышев В.И. Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О глобальном характере явления эль-ниньо в климатической системе земли Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 200-208.
10. Мохов И.И. Смирнов Д.А., Карпенко А.А. Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с разными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений. Доклады Академии наук. 2012. Т. 443. № 2. С. 225–231
11. Панин Г. Н.. Об изменениях климата в полярных зонах Земли в XX и XXI столетиях. Доклады Академии Наук. 2009. Т. 427, №3. С. 397-402.
12. Folland C., Rayner N., Brown S. et al. Global temperature change and its uncertainties since 1861. *Geophysical Research Letters* 28, 2001, p. 2621-2624.
13. Johannessen O., Bengtsson L., Miles M. et al. Arctic climate change – Observed and modeled temperature and sea ice variability. Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Report No. 218, Bergen 2002, *Tellus* 56A (2004), p. 328 –341, Corr. 559-560.
14. Bengtsson L., Semenov V., Johannessen O. The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic—A Possible Mechanism. *Journal of Climate*, October 2004, p. 4045-4057.
15. Khorostovsky K., Johannessen O., Bobylev L. In *Arctic Environmental Variability And Global Change*, Eds. Springer Praxis, Chichester, UK, pp. 270–280. 2003.
16. Parker D., Jones, P., Folland C. et al. Interdecadal changes of surface temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, V. 99, 1994, p. 14373-14399 (R)
17. Polyakov I., Bekryaev R., Alekseev G. et al. Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875 – 2000. 2003. *Journal of Climate*, 16, p. 2067-2077.
18. Rayner N., Parker D., Horton E. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, V. 108, 2003, p. 201-222
19. Мохов И. И., Демченко П. Ф., Елисеев А. В. и др. Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX-XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2002. Т. 38. № 5. С. 629 – 642.
20. Школьник И. М., Мелешко В. П., Катцов В. М. Возможные изменения климата на европейской части России и сопредельных территорий к концу XXI века: расчет с региональной моделью ГГО // *Метеорология и гидрология*. 2006. № 3. С. 5-16.
21. Семенов В.А, 2008, ДАН, Т.418, №1. С.106-109.
22. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике, 2007, т.2, изд. Наука, 135с.
23. Панин Г. Н. 2009. Об изменениях климата в полярных зонах Земли в XX и XXI столетиях. Доклады Академии Наук. Т. 427, №3. С. 397-402.
24. Раткович Д.Я.. Современные колебания уровня Каспийского моря. Водные ресурсы, 1993. Т. 20. №2. С. 160-171.
25. Голицын Г.С., Раткович Д.Я., Фортус М.И., Фролов А.В. О современном подъеме уровня Каспийского моря. Водные ресурсы. 1998. Т. 25. №2. С. 133-139.
26. Казанский А.Б. Возможный подход к прогнозу возрастания уровня Каспийского моря. Доклады Академии наук. 1994. Т.338, №4. С. 531–537.

27. Будыко М.И., Ефимова Н.А., Лобанов В.В.. Будущий уровень Каспийского моря. Метеорология и гидрология. 1988. № 35. С. 86-94.
28. Хубларян М.Г., Найденов В.И. Нелинейная теория колебаний уровня природных водоемов. Воды суши: Проблемы и решения. М. ИВП РАН. 1994. С. 193-216.
29. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: Теория и приложения. 2003. М: ГЕОС. 171 с.
30. Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г.С., Мохов И.И., Семёнов В.А., Спорышев П.В. Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря, Доклады РАН. 1999, Т.366, № 2. с. 248–252.
31. Leroy S.A.G., Arpe K. Glacial refugia for summer-green trees in Europe and South-West Asia as proposed by echam3 time-slice atmospheric model simulations// Journal of Biogeography. 2007. V. 34. No 12. P. 2115-2128
32. Elguindi N., Giorgi F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. Geoph. Res. Letter. 2006. V. 33. L08706.
33. Мелешко В.П., Катсов В.М., Мирвис В.М., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета, Метеорология и гидрология. 2008. № 8, С. 5-19
34. Panin G.N., A. E. Nasonov , Th. Foken, H. Lohse On the parametrisation of evaporation and sensible heat exchange for a shallow lakes, Theor. Appl. Climat., 2006, V. 85, N. 3-4, 123-129.
35. Панин Г.Н., Насонов А.Е., Фокен Т., Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий, Известия РАН, Физика атмосферы и океана, 2006, Т. 42, N. 3, 367-383.
36. Панин Г. Н., Т. Ю. Выручалкина, И. В. Соломонова «Вариации климата Северной Евразии в последней четверти XX века в кН., Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Москва, 2011, с. 99-115.
37. Голицын Г.С., Дзюба А.В., Осипов А.Г., Панин Г.Н. 1990. Региональные изменения климата и их проявления в современном подъеме уровня Каспийского моря. - ДАН СССР, т. 313. № 5. С. 1224 - 1227.
38. Панин Г.Н., Мамедов Р., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря, Наука, 2005, 356с
39. Gulev S.K., Belyaev K. Probability distribution characteristics for surface air–sea turbulent heat fluxes over the global ocean// Journal of Climate, 2012. V. 25, p. 184-206.
40. Панин Г.Н. Дианский Н.А., Вариации колебания уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики. Изв. РАН, ФАО (в печати).
41. Latif M., Roeckner E., Botzet M. et al. // J. Climate. 2004 Ч. 17. P. 1605-1614.
42. Mokhov I.I., Artamonov A.Yu., Bezverkhny V.A., Karpenko A.A., Muryshev K.E., Khon V.Ch., Roeckner E. // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. J. Cote (ed.). 2006. Geneva: WCRP. WMO/TD-No.1347. Section 7. P.23-24.