

УДК 551.582:551.588

## КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АРКТИКЕ, СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ, РАЙОНЕ КАСПИЯ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ<sup>1</sup>

[Г.Н. Панин], Т.Ю. Выручалкина, И.В. Соломонова

Институт водных проблем РАН,  
119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, [panin@aqua.laser.ru](mailto:panin@aqua.laser.ru)

**Резюме.** Показано, что в климатических изменениях Арктики и Европейской части России (ЕЧР) наблюдается согласованность с колебаниями интенсивности океанической циркуляции Северной Атлантики. Parameterизации циклических особенностей климата Северной Атлантики позволили выявить их влияние на уровеньный режим Каспийского моря. Для характеристики интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой используется новый индекс NAAII (North Atlantic Air Interaction Index). Приведены результаты, моделирования концентрации арктического льда с помощью модели общей циркуляции океана при предписанном атмосферном воздействии по данным реанализа NCEP в период с 1948 по 2009гг. Показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с данными дистанционного зондирования. Показано, что начавшееся снижение интенсивности Атлантической термохалинной циркуляцией (АТХЦ) и NAAII в начале XXI века может свидетельствовать о возможной смене тенденций в климатических изменениях Северной Атлантики и ледовитости Арктики. Приведен сценарий инерционного прогноза, полученный при предписанном атмосферном воздействии, показывающий тенденцию увеличения ледовитости Арктики.

**Ключевые слова.** Арктика, Атлантика, Каспийское море, интенсивность океанической циркуляции, прогноз.

## CLIMATIC CHANGES IN THE ARCTIC, NORTH ATLANTIC, THE CASPIAN SEA REGION, AND THEIR RELATIONSHIPS

[G.N. Panin]\*, T.Yu. Vyruchalkina\*, I.V. Solomonova\*

Water Problems Institute, RAS,

\*Russia, 119333, Moscow, Gubkin str., 3, e-mail: [panin@aqua.laser.ru](mailto:panin@aqua.laser.ru)

**Summary.** It is shown that climatic changes in the Arctic and the European part of Russia are correlated with the fluctuations of the intensity of the oceanic circulation of the North. The parameterization of the cyclical features of the North Atlantic climate reveal their influence on the water level regime of the

---

1. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-05-41007 РГО-а) и РНФ (соглашение №14-17-00740). В рамках РНФ выполнены первые расчеты результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой.

Caspian sea. The new index NAAII (North Atlantic Air Interaction Index) is used to characterize the intensity of interaction between the North Atlantic and the atmosphere . Results of simulations of the Arctic ice concentration with the aid of the general ocean circulation model under the specified atmospheric forcing according to the data of the NCEP/NCAR reanalysis for the period from 1948 to 2009. It is shown that the results of simulations agree well with the data of remote sensing. It is shown that the reduction in the intensity by Atlantic thermohaline circulation and NAAII started at the beginning XXI of century can indicate the possible change of the tendency in climatic changes in the North Atlantic and the state of the Arctic ice. A scenario based on persistence aimed under the specified atmospheric forcing, demonstrates the tendency to an increase in the Arctic ice.

**Keywords.** Arctic, Atlantic, the Caspian Sea, the intensity of the oceanic circulation, concentration of Arctic ice, forecast.

## Введение

Одной из наиболее важных проблем, стоящих перед наукой в XXI столетии, является проблема предсказуемости климатических изменений, в том числе связанных с человеческой деятельностью. Многочисленные исследования указывают на возможность будущего потепления климата, вызванного антропогенным ростом парниковых газов. Данные наблюдений показывают, что глобальный и региональный климат может претерпевать заметные вариации (Груза и др., 2008, Панин, 2009, Gulev, Belyaev, 2012, Бышев и др., 2011, Мохов и др., 2008, Мохов и др., 2012, Семенов, 2008), вызванные, в частности, обратными связями в системе атмосфера – полярные льды – океан. Так, климат Арктики за XX век имеет несколько периодов потепления и похолодания (Гусев, Дианский, 2014, Панин, 2009, Панин и др., 2009, Панин, Дианский, 2014, Семенов, 2008), которые, в частности, не воспроизводятся при моделировании с использованием моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Заметим, однако, что при предписанных вариациях солнечной радиации (солнечной постоянной) удается воспроизвести потепление Арктики 40-х годов с последующим похолоданием до 70 года (Suo et al. 2013). Анализ современных изменений климата на территории Северной Евразии, выполненный по данным станционных наблюдений (Панин, 2009, – Панин и др., 2009, Панин и др., 2011а, Панин и др., 2011б, Попова, Шмакин, 2006) установил значимые региональные различия климата, связанные с климатом Северной Атлантики. Оценки влияния Северной Атлантики на изменение регионального климата в Евразии (Семенов, 2008, Semenov et al., 2010, Семенов и др., 2012) показали, что примерно половину потепления в Северном полушарии за последние 30 лет составили изменения в Северной Атлантике. Для исследования колебания уровня Каспийского моря этот результат представляется исключительно важным, так как обширная водосборная территория моря находится в зоне влияния Атлантики. Возможно, что именно пренебрежение влиянием Атлантики на климат Каспийского моря

не позволило раскрыть природу длительных направленных изменений уровня Каспия.

В последние несколько лет в рамках Экспертного совета по Арктике и Антарктике при Совете Федерации РФ ведется работа по законодательному закреплению Северного морского пути (СМП) в качестве национальной транспортной магистрали России. В результате разрабатывается логистическая модель, обеспечивающая использование СПМ круглогодично. Активизация данной деятельности в Совете Федерации РФ, очевидно, связана с выводами отдельных публикаций (Lenton et al., 2008), свидетельствующими о том, что климатические изменения в Арктике достигли порогового значения, при котором могут происходить необратимые процессы, и следует ожидать в ближайшие годы полного таяния льда в летний сезон.

Теоретические исследования продолжительности навигационного периода СМП в XXI веке, выполненные в Институте физики атмосферы РАН по сценарию SRES-A1B (Хон, Мохов, 2010) показали, однако, что даже к концу XXI века навигационный период не превысит 3-4 месяцев.

Все это послужило основанием для новой оценки влияния изменчивости Северной Атлантики на вариации регионального климата с тем, чтобы учесть их при последующем прогнозировании.

### **Климатические изменения в Арктике и северной Атлантике, сценарий возможных изменений тенденций климата северной полярной зоны**

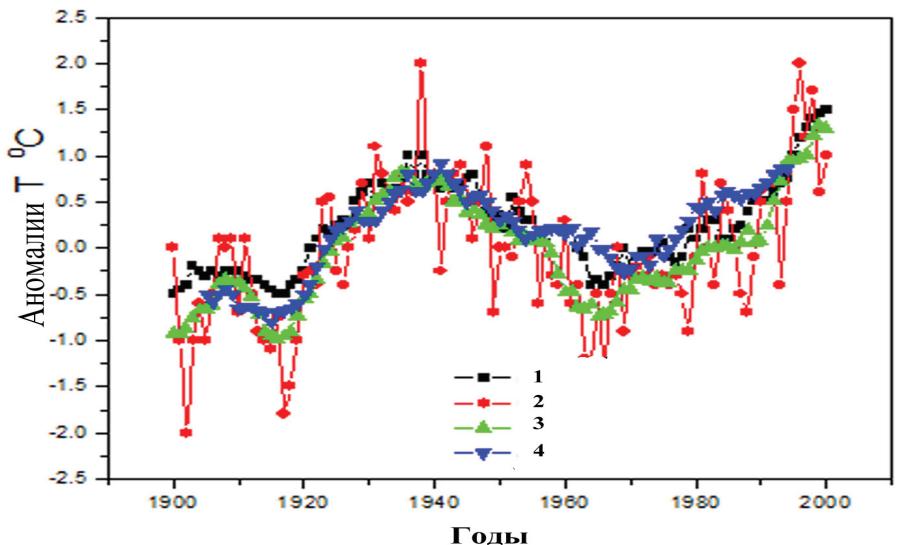
Заметим, что проблемой изменения климата полярных зон Земли, и, в частности Арктики, а также тем, в какой мере океан, и, в частности, Атлантический испытывают те или иные колебания исследуются в последнее время весьма активно (Мохов и др., 2008, Семенов, 2008, Семенов и др., 2012, Delworth, Mann, 2000, Schlesinger, Ramankutty, 1994, Johannessen et al., 2004). 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 троекратную смену направления тенденций температуры в XX в. не воспроизводят признанные модели (рис. 1).

Эксперименты (Семенов, 2008) показывают, что примерно половина наблюденного тренда в Арктическом регионе объясняется естественными изменениями климата. Данные измерений и реконструкций температуры в северной полярной зоне (Панин, 2009) также свидетельствуют о значительном вкладе циклических (около 60 лет) изменений температуры в Арктический климат.

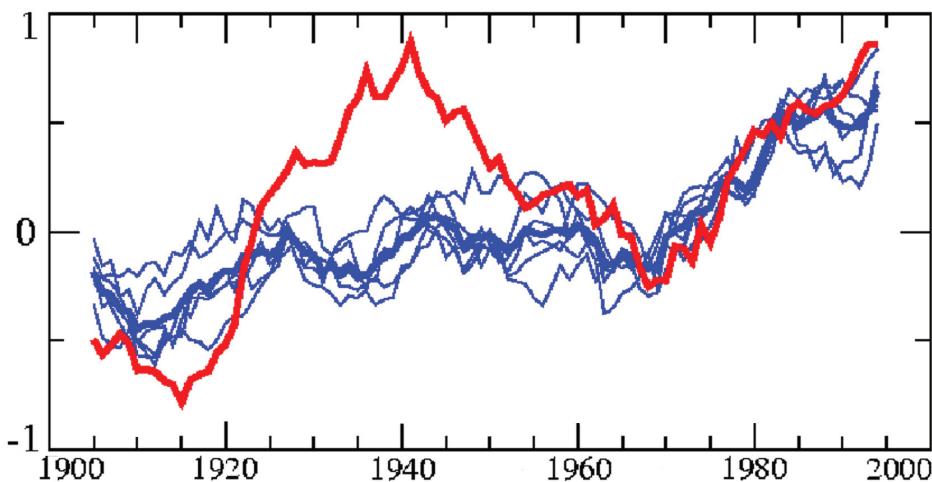
В данной работе сделана новая попытка выявить причины колебания климата Арктики, а также Европейской части России (ЕЧР), включая климат бассейна Каспийского моря. Основное внимание при этом уделено оценке роли Атлантики, которая в результате западного переноса тепла и влаги воздействует на климат Евразии. В качестве основных индикаторов

---

климатических изменений Атлантики использовались индексы Североатлантического колебания (САК), Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО), интенсивности Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ) и новый индекс интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой (НААИ).



a)



б)

*Рисунок 1 – Аномалии температуры приземного воздуха в холодный период года (ноябрь–апрель) осредненные по территории Арктики:*

*а – согласно данным 1 – (Johannessen et al, 2004), 2 – (Фролов и др., 2007) и 3 – их слаженные значения, 4 – (Jones et al, 1999);*

*б – результаты моделирования ECHAM-5 (синие линии) и наблюденные (Jones et al, 1999) (красная линия).*

Использовались результаты моделирования основных колебаний Атлантического океана с помощью МОЦО INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) (Володин и др., 2013, Гусев, Дианский, 2014).

Сценарий эксперимента соответствовал международной программе CORE (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments) II 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 2007гг. (Гусев, Дианский, 2014). Результаты последнего 5-го 60-летнего цикла, досчитанного до 2009г., полагаются в качестве основных данных, характеризующих изменчивость циркуляции Мирового океана за означенный период времени. Для расчета атмосферного воздействия использовалась специализированная база данных 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; длинноволновая и коротковолновая радиации (временной интервал – сутки); среднемесячные атмосферные осадки и сток рек. Расчет потоков тепла, соли и момента на поверхности океана осуществлялся согласно балк-формулам.

В (Гусев, Дианский, 2014) было показано, что временной ход среднегодового индекса Атлантической мультидекадной осцилляции (AMO) за 1948 – 2009гг. по данным наблюдений <http://www.cdc.noaa.gov/Correlation/amon.us.long.data> и по результатам модельных расчетов по INMOM хорошо согласуются между собой, что свидетельствует о возможности использовать результаты модельных расчетов для оценки климатической изменчивости циркуляции Северной Атлантики.

Заметим, что главным фактором климатической изменчивости океана является изменчивость его термохалинной циркуляции. АТХЦ представляет собой крупномасштабный меридиональный круговорот воды в Северной Атлантике, образуя североатлантическую ячейку океанского конвейера Брокера-Лаппо. Этот круговорот дает основной вклад в формирование североатлантического меридионального переноса тепла (МПТ) в высокие широты Северного полушария. На рис. 2 показаны временной ход индекса АТХЦ (максимум функции тока меридионального круговорота) и суммарного МПТ в области от 30°N до 60°N в атлантическом секторе по результатам модельных расчетов по INMOM.

Интенсивность АТХЦ (рис. 2) характеризуется значительными долгопериодными колебаниями, сопровождаемыми аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) в Северной Атлантике (Гусев, Дианский, 2014). Этот процесс может определять связь между долгопериодной изменчивостью АТХЦ и климатическими режимами в Евразии и Арктике (Панин и др., 2009, Mokhov et al., 2006). Значительный рост интенсивности АТХЦ, начавшийся с середины 1970 годов, сменился на заметное ее падение с конца 1990гг., которое проявляется также и для эволюции МПТ. Измене-

ние этих величин согласуется с ходом температуры поверхности океана (ТПО) в эти годы, проявляющимся в индексе АМО. Такой ход индексов АТХЦ и АМО может объясняться тем, что при росте приповерхностной температуры и осадков в субарктических широтах здесь должно происходить снижение солености и плотности приповерхностного слоя.

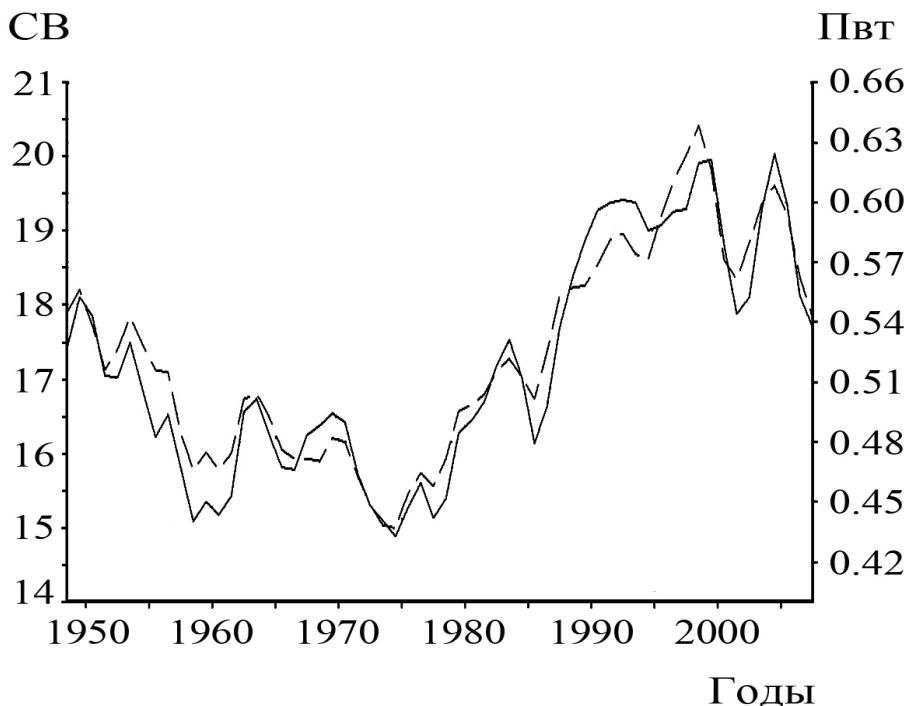


Рисунок 2 – Временная эволюция среднегодового максимума меридиональной функции тока, как индекса интенсивности АТХЦ, (шкала в Св слева, сплошная линия) и МПТ, среднего в полосе  $30\text{--}60^{\circ}\text{N}$ , (шкала в Пвт справа, пунктир) в Северной Атлантике по результатам модельных расчетов по INMOM.

Этому же способствуют и вынос более пресных вод из Арктического бассейна за счет таяния морских льдов и увеличение речного стока в Арктический бассейн (Гусев, Дианский, 2014). В результате должна увеличиться устойчивость верхнего слоя океана, приводящая к ослаблению высоколатитных конвективных процессов и, следовательно, интенсивности меридионального круговорота в Атлантике (с соответствующим изменением положения и ослаблением Северо-Атлантического течения как одной из составляющих АТХЦ). Это, в свою очередь, может существенно сказаться на региональных особенностях климата высоких и средних широт Северного полушария, в частности, ледового режима западной Арктики. Заметим, что характер изменчивости АТХЦ (ее интенсификация в последние десятилетия XX века) мог способствовать стремительному потеплению в западном секторе Арктики. Начавшееся снижение активности АТХЦ в начале XXI века может свидетельствовать о грядущем похо-

лодании в западной Арктике, что, в частности, отмечается в отдельных публикациях (Панин, 2009, Панин, Дианский, 2015). Величина индекса АТХЦ колеблется от 15 до 21 Свердрупов (Св), составляя в среднем около 18 Св, что хорошо согласуется с оценками по данным наблюдений и зарубежными модельными расчетами.

Важным фактором климатического воздействия Атлантического океана на Северную Евразию, включая Арктику, является западный атмосферный перенос, связанный с вращением Земли вокруг своей оси (Панин, 2009, Панин и др., 2009). Интенсивность этого воздействия напрямую должна быть связана с величиной результирующего потока тепла между океаном и атмосферой. Величина результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой по результатам модельных расчетов по INMOM (рис. 3) колеблется от 14 до 21  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , достигая максимума в середине девяностых годов XX столетия.

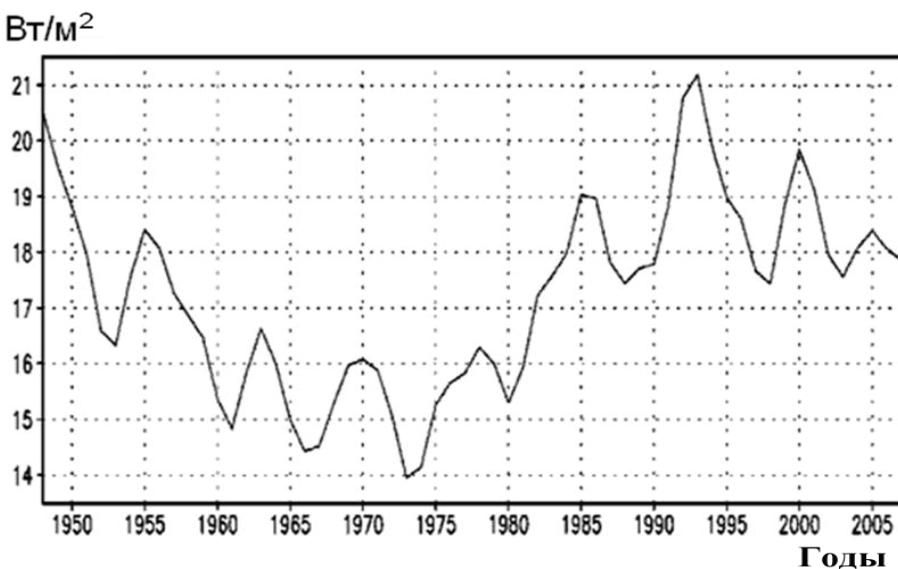


Рисунок 3 – Вариации результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) по результатам модельных расчетов по INMOM за период 1948–2009 гг. в полосе 30–60°с.ш. в Северной Атлантике.

Изменчивость результирующего потока тепла между Северной Атлантикой и атмосферой также, как и АТХЦ характеризуется значительными долгопериодными колебаниями. Оценка зон влияния Северной Атлантики на Евразию, включая северную полярную зону, сделанная ранее (Панин и др., 2009) с помощью корреляционного анализа между зимними значениями температуры воздуха и зимними значениями индекса САК при разных тенденциях в изменении индексов АТХЦ и МПТ, свидетельствуют о непосредственном влиянии последней на вариации климата указанных регионов.

Заметим, что характер изменения результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой (его интенсификация в последние деся-

тилетия XX века от значений  $14 \text{ Вт}/\text{м}^2$  до  $21 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ) также мог способствовать стремительному потеплению в западном секторе Арктики в XX веке. Действительно, увеличившийся результирующий поток тепла от Северной Атлантики в последние десятилетия XX века, под влиянием западного атмосферного переноса мог способствовать потеплению в западном секторе Арктики, а соответственно привести и к увеличению продолжительности навигационного периода Северного морского пути (СМП). Заметим, что такой дополнительный перенос тепла в сочетании с транспортом влаги наряду с потеплением значительной части Евразии привели и к заметному росту уровня Каспийского моря в конце XX века (Панин, Дианский, 2014).

Для характеристики интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой предложено использовать новый индекс NAAII (North Atlantic Air Interaction Index), который рассчитывается по данным измерения атмосферного давления в Рейкьявике и Лиссабоне и данным о температуре поверхностного слоя воды Северной Атлантики. В данной версии индекс NAAII рассчитывался в виде:

$$NAAII = \frac{\Delta P}{\Delta P} * AMO$$

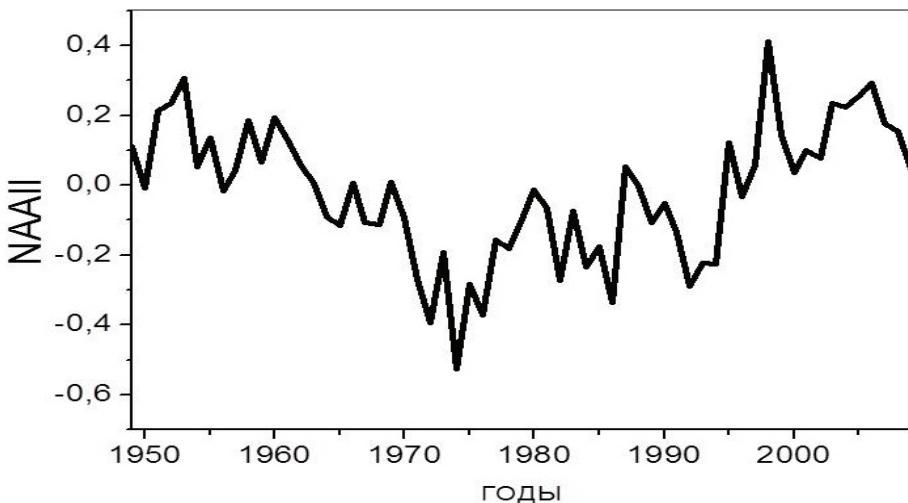
где:

$\Delta P$  – значения разности атмосферного давления в Рейкьявике и Лиссабоне за год, нормированные на среднее значение указанной разности давлений за период измерений (1821-2013гг.).

В итоге, среднегодовые значения NAAII получаются как произведение величины индекса АМО на нормированное значение разности давлений в Рейкьявике и Лиссабоне. В работе использовалось АМО, рассчитанное как скользящее среднее за десять лет аномалий температуры поверхности Атлантического океана севернее экватора. Индекс NAAII, рассчитанный таким образом позволяет количественно судить об изменениях интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой. В отличие от результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой индекс NAAII, может быть рассчитан по стандартной информации об атмосферном давлении и значениям индекса АМО. Значения индекса интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой (NAAII) за период 1948-2009гг. представлены на рис. 4.

Изменчивость индекса интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой (рис. 4) также, как и результирующего потока тепла, между Северной Атлантикой и атмосферой (рис. 3) характеризуется значительными долгопериодными колебаниями. Заметим, что характер изменчивости индекса NAAII и результирующего потока тепла между Атлантикой и атмосферой хорошо согласуются между собой. Это дает основание использовать далее индекс NAAII для оценки непосредственного влияния изменения климата Северной Атлантики на вариации климата в Северной Евразии и Арктике.

По крайней мере, активизация таяния льда в Арктике в семидесятые – девяностые годы XX столетия согласуется с ростом индекса NAAII.



*Рисунок 4 – Вариации индекса интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой (NAAII) за период 1948-2009 гг.*

Следует заметить, что по результатам расчетов циркуляции Мирового океана выявлено заметное падение интенсивности АТХЦ и результирующего потока тепла между океаном и атмосферой в конце XX и начале XXI столетий, которое проявляется также и в эволюции индекса NAAII. Это изменение тенденций индексов АТХЦ и NAAII в конце XX столетия может свидетельствовать о предстоящей смене тенденций в ледовитости Арктики. Начавшееся снижение интенсивности указанных индексов к началу XXI века может свидетельствовать о возможном грядущем похолодании в западной Арктике, что весьма вероятно может привести и к уменьшению продолжительности навигационного периода Северного морского пути (СМП).

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

С использованием модельных экспериментов (Гусев, Дианский, 2014, Панин, Дианский, 2015), была получена оценка изменения ледовитости СЛО. На рис. 5 показаны результаты моделирования временной эволюции площади морского льда СЛО за 1948-2007 гг. в сентябре при предписанном атмосферном воздействии CORE и данные спутниковых наблюдений [ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/G02135/Sep/N\\_09\\_area.txt](ftp://sidads.colorado.edu/DATASETS/NOAA/G02135/Sep/N_09_area.txt).

Результаты моделирования хорошо согласуются с данными спутниковых наблюдений. Заметим, что тенденции изменения ледовитости СЛО (рис. 5) находятся в противофазе с вариациями АТХЦ (рис. 2) и индекса NAAII (рис 4). Снижение активности АТХЦ и индекса NAAII в период с 1948 г. до середины семидесятых лет согласуется с ростом ледовитости СЛО в

этот период. Рост активности АТХЦ и индекса NAAII с середины семидесятых до конца XX столетия сопровождается уменьшением площади морского льда СЛО.

В целом, можно отметить, что в модели эволюция площади морского льда СЛО воспроизводится довольно успешно и, что влияние АТХЦ и индекса NAAII на формирование ледового покрова в Арктическом бассейне существенно. Все это стимулировало попытку оценить тенденцию возможных изменений ледовитости Арктики в XXI веке. Сценарий возможных изменений ледовитости Арктики до 2020г. с инерционным прогнозом атмосферного воздействия (повторяющиеся данные за 2009г.) представленный на рис 5, иллюстрирует смену тенденции в эволюции ледовитости СЛО. Определенно можно видеть, что со сменой тенденции АТХЦ (рис. 2) и индекса NAAII (рис. 4) происходит смена тенденции и в эволюции ледовитости в Арктическом бассейне (рис. 5).

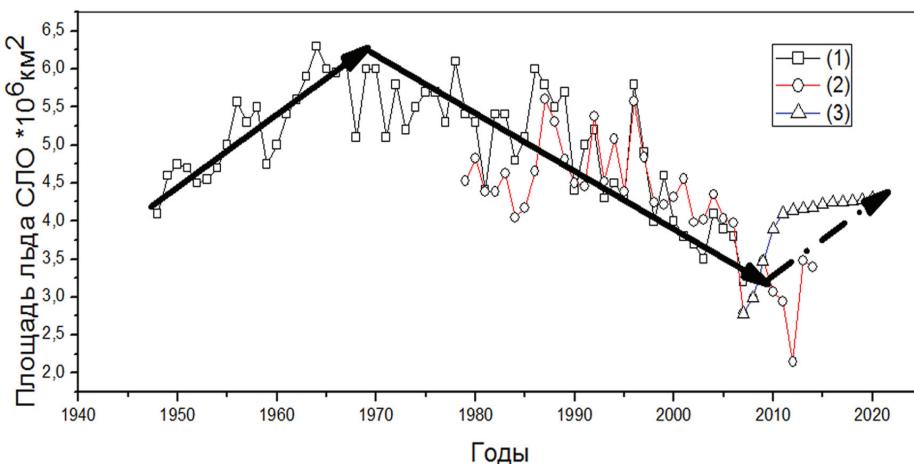


Рисунок 5 – Результаты воспроизведения площади арктического льда в сентябре с помощью модели общей циркуляции океана INMOM (1) при предписанном атмосферном воздействии, полученным по данным реанализа NCEP в период с 1948 по 2009гг. с прогнозом (3) возможных изменений на перспективу (в качестве прогноза атмосферного форсинга используются данные за 2009г.). (2) – данные спутниковых наблюдений (NOAA). Стрелками показаны тенденции изменения ледовитости СЛО.

Заметим, что ранее уже отмечалась возможная смена тенденции ледовитости СЛО (Панин, 2009, Панин и др., 2009) в результате исследования циклических особенностей климатических изменений полярных зон и предложен сценарий климатических вариаций полярных зон в XXI столетии, базирующийся на композиции «парникового» и «циклического» эффектов.

В первом приближении предложено учитывать циклический эффект в виде:

$$T \approx T_{IPCC} + k \sin \omega t$$

где:

$T$  – прогнозируемая температура приземного воздуха;

$T_{IPCC}$  – температура, прогнозируемая МГЭИК (IPCC), и характеризующая антропогенное воздействие на климат;

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

Этот сценарий (формула 1) региональных климатических изменений фактически представляет собой предсказанный МГЭИК рост температуры, который усложнен квазипериодическими изменениями с периодом 60 лет (рис. 6).

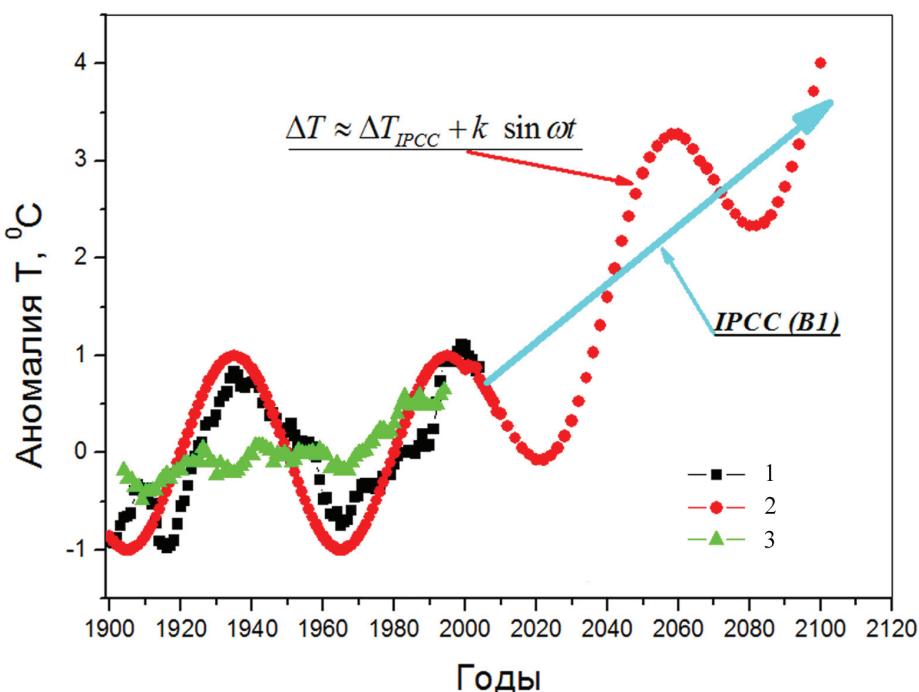


Рисунок 6 – Результаты оценки по данным наблюдений и моделирования температурных изменений в Арктике по (Панин, 2009).

С удалением от полюсов амплитуда квазипериодических колебаний уменьшается, и с приближением к тропической зоне прогноз изменения температуры практически не будет отличаться от прогноза МГЭИК (Панин, 2009).

По-видимому, причиной ускорившегося потепления Арктики в 70 – 90 годы XX века являлась положительная фаза естественных долгопериодных климатических изменений в Северной Атлантике, наложившаяся на антропогенный фактор потепления. На границе XX и XXI столетий положительная фаза естественных климатических изменений сменилась на

отрицательную (рис. 6) и в связи с этим период стремительных температурных изменений, происходящих в последние десятилетия, закончился. В текущие 30 лет (полупериод) в соответствии с предложенной моделью должна измениться тенденция климатических изменений в Северной Атлантике, а соответственно, и в Арктике, в результате чего ожидается период восстановления в СЛО утраченной ледовитости (этот период смены тенденции климатических изменений уже получил название HIATUS – перерыв, разрыв тенденции).

В течение следующего полупериода (начиная примерно с 2035 – 2040 гг.) учет указанной цикличности может привести к новой, еще более существенной, чем наблюдалась в конце XX века положительной скорости изменения температуры и соответственно более сильному потеплению, чем это следует из результатов моделирования МГЭИК.

### **Климатические изменения в бассейне Каспийского моря**

#### ***Вариации колебания уровня Каспийского моря и результаты прогнозирования***

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, и т.д. Так, согласно исследованиям (Раткович, 1993) уровень Каспийского моря, в период, начиная с конца XX века должен понижаться, а в (Голицын и др., 1998), использующих аналогичный подход к водному балансу, прогнозируется подъем уровня моря. В (Казанский, 1994) прогнозируется еще более интенсивный подъем уровня моря в этот же период. В то же время данные наблюдений свидетельствуют о том, что окончание XX века характеризовалось ростом уровня моря, а начало XXI века снижением, достигшим к 2012 году почти одного метра (рис. 7).

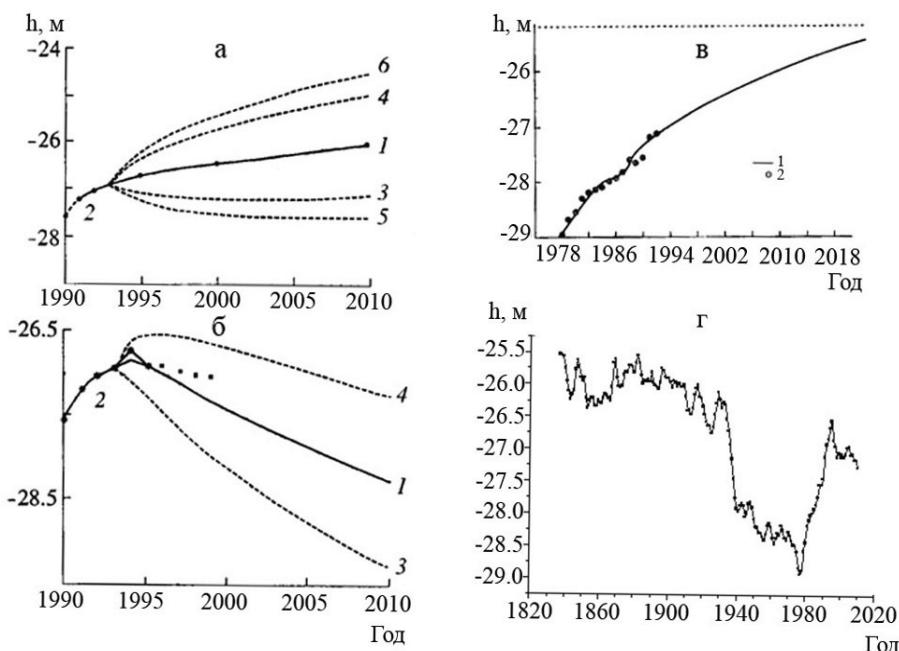
Попытки прогноза уровня Каспия, основанные на работе (Будыко и др., 1988) с учетом прогноза антропогенных изменений климата, также не приводят к надежным результатам.

Учет нелинейности системы уравнений водного и теплового баланса (Хубларян, Найденов, 1994) показал, что характер ее решения для прогнозирования может меняться, возникают не единственные и неустойчивые решения для описания изменения уровня моря на перспективу.

В (Фролов, 2003) предлагается результаты расчетов установленного режима Каспийского моря на долговременную перспективу (например, 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 уровневых колебаний

---

при этом приобретает адаптивный характер, учитывающий происходящие и уточняющие перспективные изменения параметров природных и антропогенных процессов, формирующих уровненный режим.



*Рисунок 7 – Временной ход уровня Каспийского моря согласно исследованиям Голицына и др. (Голицын и др, 1998) (а), Ратковича (Раткович, 1993) (б), Казанского (Казанский, 1994) (в). Реальный ход уровня Каспийского моря с 1840 по 2010 гг. (г). 1 – условное математическое ожидание уровня, 2 – уровень до начала прогноза по данным наблюдений, 3 – 6 границы доверительных 90% – и 98% интервалов соответственно, точки на графике (б) – данные наблюдений (2) и прогноз (1)*

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 совместно с сотрудниками Института физики атмосферы РАН (Арпе и др., 1999) 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. Несколько позже (Leroy, Arge, 2007) с использованием трех моделей МОЦАО получен новый результат, согласно которому прогнозируется постоянство уровня моря вплоть до окончания XXI века (рис. 8).

Исследования этого региона, выполненные в это же время итальянскими учеными (Elguindi, Giorgi, 2006) для разных сценариев (IPCC A2 и A1b) показали, что в течение XXI века по большинству моделей, наоборот, ожидается устойчивое снижение уровня Каспийского моря (рис. 9).

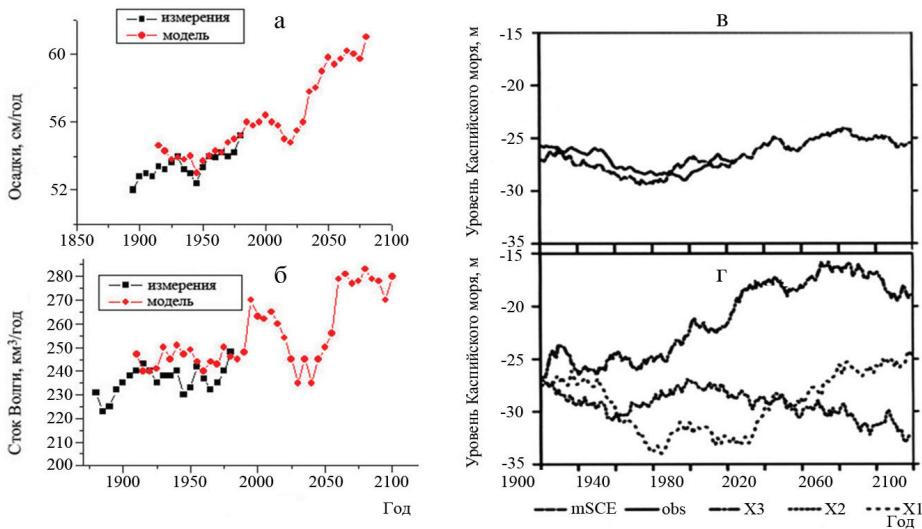


Рисунок 8 – Временной ход и прогноз изменения осадков (а) и стока р. Волги (б), уровня Каспийского моря (в, г). а, б – по данным (Arpe и др., 1999), в, г – по данным (Leroy, Arpe, 2007)

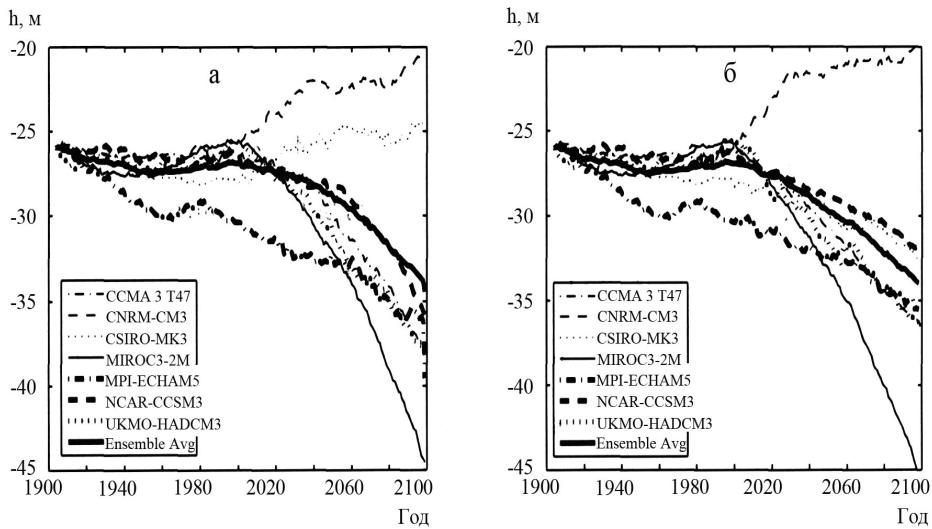


Рисунок 9 – Прогноз изменения уровня Каспийского моря в XXI веке по сценариям IPCC A2 (а) и A1B (б) согласно работе (Elguindi, Giorgi, 2006)

Еще более поздние исследования этого региона, проведенные в Главной геофизической обсерватории (Мелешко, 2008) с помощью семи моделей (IPCC) показали, что уровень моря в XXI веке не будет значимо изменяться.

Итак, мы видим, что использование, как стохастических моделей, так и современных моделей МОЦАО не приводят к согласованным результатам в прогнозировании изменений уровня моря на перспективу. Модели дают

результаты, согласно которым можно ожидать как снижение уровня Каспийского моря, так и его повышение или стабилизацию в XXI веке. 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 наши результаты (Панин и др., 2006, Панин и др., 2011б) показали обнадеживающие возможности для более достоверной оценки испарения Каспийского моря, что особенно важно учитывать при прогнозировании уровня 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 о будущих тенденциях изменения уровня Каспийского моря.

### *Связь климата Каспийского моря с процессами глобального характера*

Покажем, как изменчивость гидрологического режима Каспийского моря может быть описана с привлечением уравнений водного баланса моря и баланса влаги его бассейна. Выпишем уравнение водного баланса замкнутого водоема, применительно к Каспийскому морю:

$$dh / dt = Q(t) / F(h) + P_L - E_L + U / F(h) \quad (2)$$

где:

$Q(t)$  – речной сток;

$U$  – подземный сток;

$F(h)$  – площадь зеркала моря при определенном уровне моря  $h$ ,  $P_L$ ;

$E_L$  – атмосферные осадки и испарение соответственно над зеркалом моря.

Далее запишем уравнение баланса влаги над регионом, включающим водоем и его бассейн, в следующем виде:

$$dW / dt + W_\Gamma = E - P \quad (3)$$

где:

$dW$  – интегральное влагосодержание атмосферы над регионом;

$W_\Gamma$  – суммарный поток влаги через боковую границу  $\Gamma$  рассматриваемого региона;

$P$  и  $E$  атмосферные осадки и испарение соответственно, проинтегрированные по площади региона.

Уравнение (3) легко получается путем интегрирования уравнения для влажности атмосферы (см., например, (Gill, 1982)) по площади рассматриваемого региона и от поверхности земли до некоторой большой высоты, на которой содержание влаги пренебрежимо мало, по сравнению с нижележащими слоями. В уравнениях (2) и (3) будем полагать, что все переменные являются среднегодовыми величинами, и производные по времени характеризуют межгодовую изменчивость.

В случае Каспийского моря слагаемым  $U/F(h)$  можно пренебречь, поскольку  $U/F(h) \approx (0,01 \dots 0,02)E_L$  (Панин и др., 2005). Учитывая также, что среднегодовой речной сток определяется в основном разностью осадков и испарения на водосборе, положим  $Q/F(h) = (P/F(h) - P_L) - (E/F(h) - E_L)$ . Тогда из уравнения (2) получим очевидное соотношение:

$$dh/dt = (P/F(h) - P_L) - (E/F(h) - E_L) + P_L - E_L \equiv (P - E)/F(h), \quad (4)$$

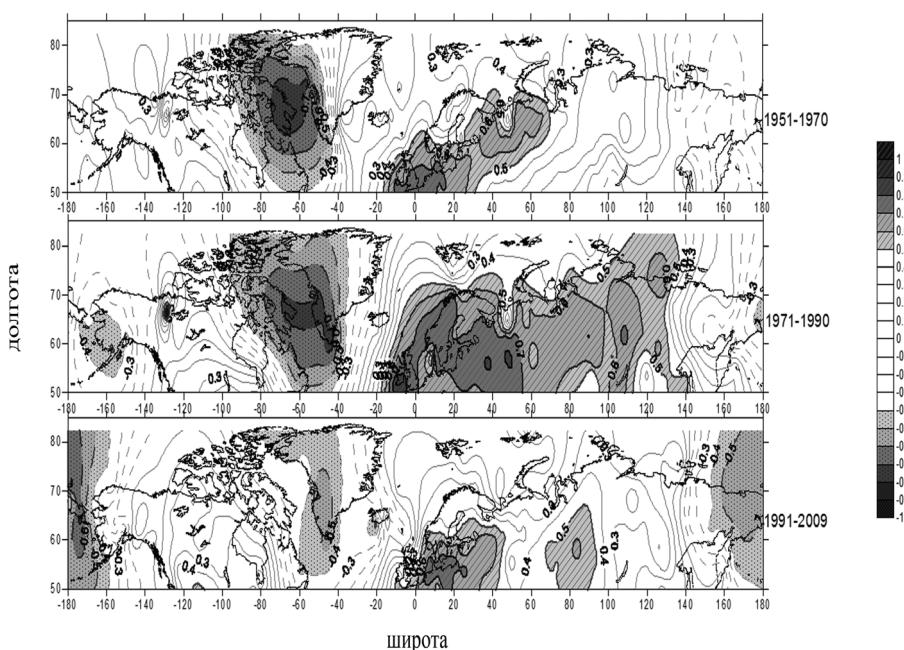
показывающее, что изменения уровня Каспийского моря определяются балансом осадков и испарения во всем регионе.

Сравнивая уравнения (3) и (4) получаем, что изменение уровня Каспийского моря может быть определено в виде:

$$\frac{dh}{dt} = \left( \frac{dW}{dt} + W_R \right) \left( -\frac{1}{F(h)} \right) \approx -W_R/F(h) \quad (5)$$

Из (5) следует, что изменение уровня моря, а соответственно, и изменение атмосферных осадков и испарения существенным образом зависят от интенсивности горизонтального переноса воздушных масс и направления их переноса.

Анализ, выполненный в (Голицын 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 над Северной Атлантикой дает анализ Североатлантического колебания, характеризующего западно-восточный перенос над Североатлантическим сектором и описывающегося, например, индексом, основанным на разности атмосферных давлений между Азорским максимумом и Исландским минимумом. Западный перенос, определяющий перемещение воздушных масс с Атлантики на Евразию, модулируется воздействием Североатлантического колебания. В связи с этим проанализируем связи процессов, происходящих в бассейне Каспийского моря с особенностями атмосферной циркуляции, характеризуемой индексом САК (рис. 10).



*Рисунок 10 – Корреляции между зимними значениями температуры воздуха в Северном полушарии и зимними значениями индекса САК (осредненными за периоды 1951-1970гг., 1971-1990гг., 1991-2009гг.) при разных тенденциях в изменении уровня Каспийского моря.*

Рисунок 10 иллюстрирует согласованность изменения уровня Каспийского моря с изменениями зон влияния индекса САК на Евразию. Хорошо видно, что период снижения уровня моря (1940-1977 и 1996-2012гг.) 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 то же 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. 11). Из рисунка 11 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.

Вариации в изменении зон распространения влияния САК на водосборную территорию приводят и к непосредственному влиянию на сток р.Волги, его инкремент (рис. 12). Здесь индекс САК (Hurrell, 1995) получен как разность нормированного давления на уровне моря между станциями Лиссабон (Португалия) и Рейкьявик (Исландия).

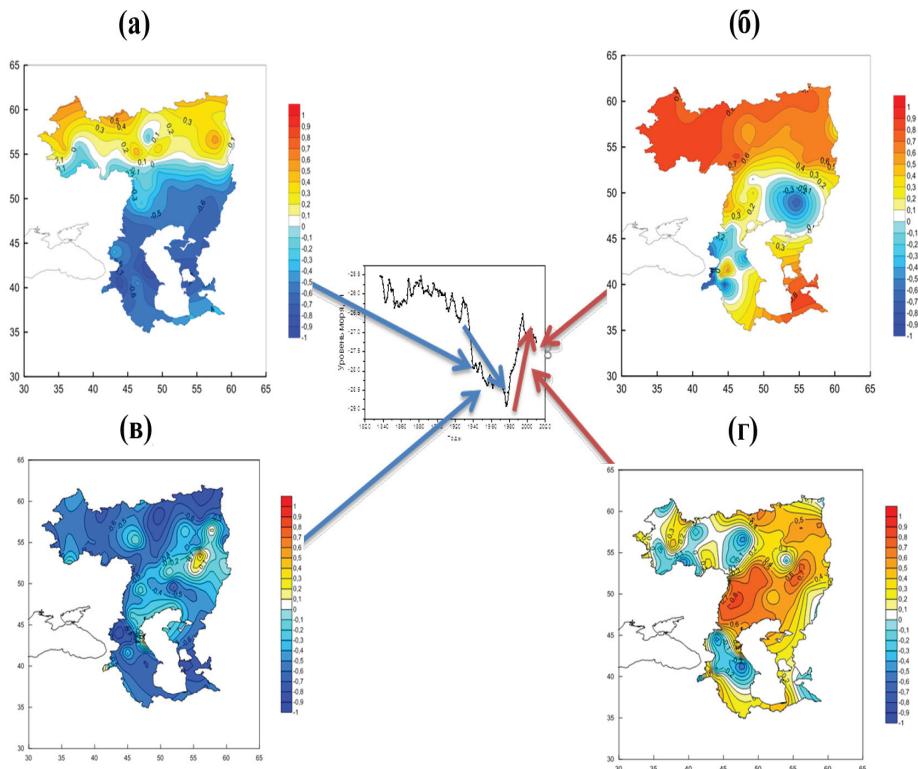


Рисунок 11 – Корреляция между годовыми значениями температуры (а – 1946-1977 гг., б – 1978-1995 гг.) и осадков (в – 1946-1977 гг., г – 1978-1995 гг.) в бассейне Каспийского моря с годовыми значениями САК и уровенный режим Каспийского моря (д)

Значение интегрального нормированного стока р.Волги:

$$\sum \frac{RF_i - \bar{RF}}{\bar{RF}} / C_V$$

где:

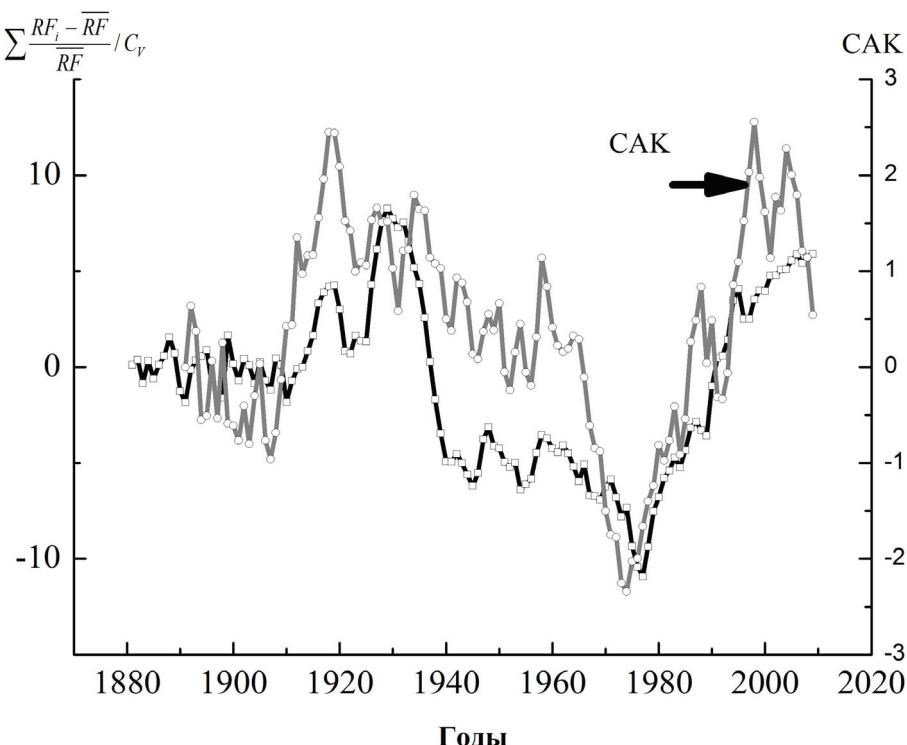
$RF_i$  – текущее значение стока за год;

$\bar{RF}_i$  – среднее значение стока за период наблюдений;

$C_V$  – коэффициент вариации стока р.Волги

Коэффициент вариации стока р.Волги и индекс САК, представленный на рисунке 4, со сдвигом 10 лет, иллюстрируют хорошую согласованность во временном ходе.

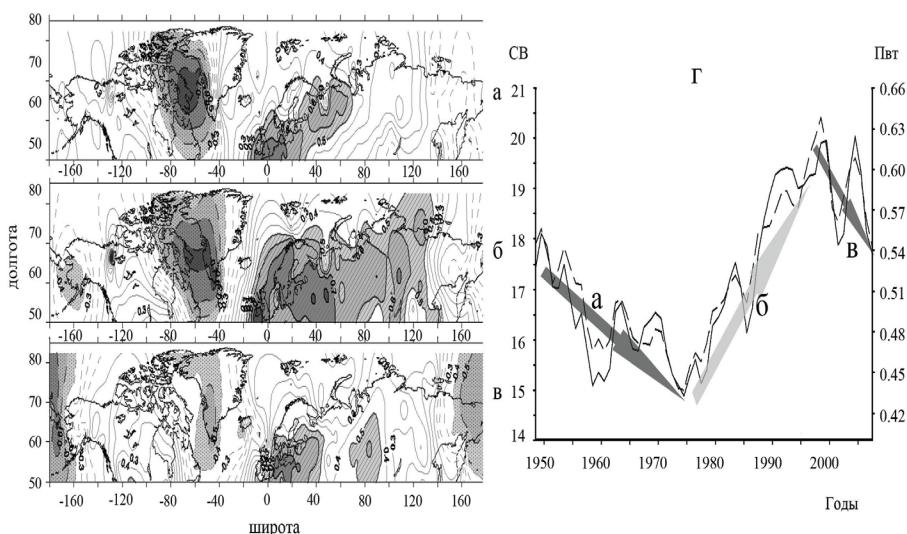
Корреляция между индексом САК, сдвинутым на 10 лет, и инкрементом стока р. Волги составляет  $R = 0,73$ , что свидетельствует о возможности использовать индекс САК в качестве предиктора для прогноза стока р. Волги.



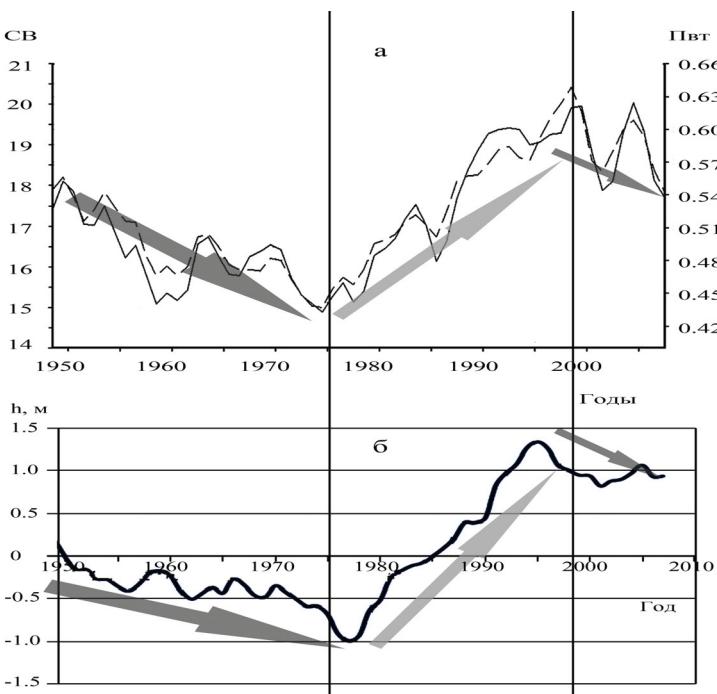
*Рисунок 12 – Изменчивость интегрального нормированного стока р. Волги  
Формула и годовой индекс САК, слаженный с применением 9-летнего  
скользящего среднего (со сдвигом 10 лет вперед).*

Согласованность в тенденциях хода уровня Каспийского моря с индексом САК (рис. 10, 11) и стока р. Волги с САК (рис. 12), а также согласованность САК с индексами АТХЦ и МПТ свидетельствуют о непосредственном влиянии последних на вариации климата Евразии и ход уровня моря. Все это указывает на то, что для прогнозирования 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 скорости приземного ветра).

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. 13) свидетельствуют и о непосредственном влиянии последних на вариации климата Евразии, ход уровня Каспийского моря. Действительно, увеличение зоны воздействия САК на ЕЧР в период с 70 по 90 годы XX века согласуется с активизацией индексов АТХЦ и МПТ (рис. 13), увеличением стока р. Волги (рис. 12) и ростом уровня моря (рис. 7, 14). Падение уровня Каспийского моря согласуется со снижением зоны воздействия САК на ЕЧР, снижением стока р. Волги и снижением индексов АТХЦ и МПТ в период с 50 по 70 годы XX века и в начале XXI века соответственно.



*Рисунок 13 – Связи между зимними значениями температуры воздуха в Северном полушарии и САК, за периоды (а – 1951-1970гг., б – 1971-1990гг., в – 1991-2009гг.); вариации термохалинной циркуляции и меридионального переноса тепла по результатам модельных расчетов по INMOM в области от 30°N до 60°N в атлантическом секторе за период 1948-2007гг. (г).*



*Рисунок 14 – Связи между эволюцией уровня Каспийского моря (б) и индексами АТХЦ и МПТ (а) по результатам модельных расчетов по INMOM в области от 30°N до 60°N в атлантическом секторе за периоды 1948-2007гг.*

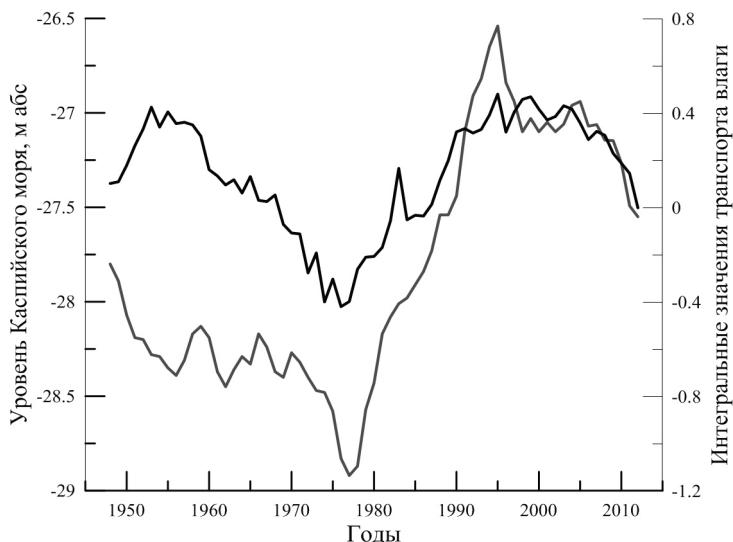
Следует заметить, что изменения тенденций индекса САК происходят с опережением основных тенденций в стоке р.Волги (рис. 12) и уровня Каспийского моря приблизительно на десять лет и поэтому использование САК имеет определенный прогностический эффект. Таким образом, учет изменения тенденций индекса САК, а также индексов АТХЦ и МПТ (рис. 14) в целом открывает новые возможности при диагнозе и прогнозе уровняенного режима Каспийского моря.

Индекс САК, как известно, характеризуется динамикой разностей атмосферных давлений между Азорским максимумом и Исландским минимумом, 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 (формулы 3-5). Это количество переносимой влаги находится в прямой зависимости как от количества самой влаги над Северной Атлантикой, так и от скорости и направления ее переноса. Для расчета транспорта влаги использовались данные реанализа NCEP/NCAR. Атмосферные характеристики включали в себя глобальные поля следующих величин: температура воздуха, удельная влажность и скорость ветра на 8 уровнях (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400 и 300 Мб) – все величины с временным интервалом один месяц. Расчет переноса влаги с Северной Атлантики рассчитывался как интегральное значение в слое от 1000 до 300 Мб от 30° до 70°с.ш. Оценка непосредственного влияния транспорта влаги на бассейн Каспийского моря была сделана для региона, ограниченного меридианами 35° и 57,5°в.д. Результаты расчетов приведены на рис. 15 и убедительно показывают согласованность уровняенного режима Каспийского моря с транспортом влаги. Периоды падения и подъема уровня Каспия полностью согласуются с аналогичными периодами в интенсивности транспорта влаги над бассейном Каспийского моря. Момент смены тенденций, приходящийся на 1978г., совпадает с точностью до года. И, что особенно важно, смена тенденций в уровне Каспийского моря с подъема на падение также согласуется с транспортом влаги (рис. 15).

В целом можно констатировать, что природа колебаний уровня Каспийского моря обусловлена сменой тенденций в транспорте влаги с Атлантики на его бассейн. По результатам расчетов циркуляции Мирового океана также выявлено заметное падение интенсивности Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ) к концу XX столетия, которое проявляется также и для эволюции меридионального переноса тепла (МПТ) в океане (Гусев, Дианский, 2014, Панин, Дианский, 2014), результирующего потока тепла, между Северной Атлантикой и атмосферой (рис. 3) и изменчивости индекса интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой (рис. 4).

Заметим, что изменчивость указанных индексов, транспорта влаги и уровня Каспийского моря характеризуется значительными долгопериод-

ными колебаниями и хорошо согласуются между собой. Это дает основание использовать далее эту информацию для оценки непосредственного влияния изменения климата Северной Атлантики на вариации климата в Северной Евразии.



*Рисунок 15 – Среднегодовые значения уровня Каспийского моря (светлая линия) и интегральные значения среднегодового транспорта влаги для региона, ограниченного 35° и 57,5°в.д. (темная линия).*

Таким образом, можно констатировать, что воздействия Северной Атлантики на ЕЧР, включая бассейн Каспийского моря, является определяющим в формировании изменения климата последних.

Все эти факты представляются важными, так как позволяют рассматривать используемые здесь индексы атмосферной и океанской циркуляции в качестве предикторов для прогнозирования уровенного режима Каспия на ближайшую перспективу. По крайней мере, можно отметить, что снижение уровня Каспийского моря, происходящее в настоящее время, согласуется со снижением интенсивности индексов АТХЦ, NAAII и транспорта влаги и, по-видимому, продолжится и далее.

То, в какой мере предложенные механизмы в те или иные времена оказывают влияние на климатические изменения должно быть предметом дальнейших углубленных исследований. Однако проведенные исследования свидетельствуют, 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. По крайней мере, можно предположить, что очередная смена тенденций индексов АТХЦ, NAAII и транспорта влаги может произойти примерно через два десятилетия, а поэтому снижение уровня Каспийского моря, происходящее последнее десятилетие, продолжится еще в течение 15-20 лет.

## Заключение

В результате ряда исследований выявлены связи изменений климата в Арктике с процессами глобального характера, которые в данном случае могут быть описаны индексами атмосферной и океанической циркуляции. Показано, что наблюдается согласованность в тенденциях хода ледовитости СЛО с индексами АТХЦ и результирующего потока тепла между океаном и атмосферой. Для характеристики интенсивности взаимодействия Северной Атлантики с атмосферой предложено использовать новый индекс NAAII (North Atlantic Air Interaction Index), который рассчитывается по данным атмосферного давления в Рейкьявике и Лиссабоне и данным о температуре поверхностного слоя воды Северной Атлантики.

По результатам расчетов выявлены заметные вариации интенсивности АТХЦ, и NAAII, которые в последние три десятилетия XX века могли способствовать стремительному потеплению в западном секторе Арктики. Это указывает на то, что при прогнозировании изменения термического режима СПЗ, продолжительности навигационного периода СМП важно рассматривать не только динамическое и температурное региональное влияние, но также и особенности изменчивости циркуляции океана и атмосферы в Северной Атлантике. Показано, что прогноз изменений климата СПЗ 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.

Результаты эксперимента (Гусев А.В., Дианский Н.А., 2014, Панин, Дианский, 2014) по воспроизведению циркуляции Мирового океана в период с 1948 по 2009гг. и параметризация циклических особенностей климата (Панин, 2009) позволили по-новому исследовать климатическую изменчивость Арктики. Эксперименты с моделью общей циркуляции океана, при использовании предписанного по данным наблюдений атмосферного воздействия, показывают, что АТХЦ и NAAII действительно усиливалась в последние несколько десятилетий XX столетия. Это, в свою очередь, могло существенно сказаться на региональных особенностях климата высоких широт Северного полушария, в частности, Западной Арктики. По крайней мере, изменчивость АТХЦ (рост ее интенсивности в последние три десятилетия XX века), наряду с ростом NAAII, могло свидетельствовать о стремительном потеплении в западном секторе Арктики (эти изменения, по-видимому, привели и к увеличению продолжительности навигационного периода северного морского пути в Арктике).

Начиная с конца XX столетия, выявлено заметное падение интенсивности АТХЦ и NAAII. Такое снижение интенсивности указанных индексов может свидетельствовать о возможной тенденции роста площади льда в начале XXI века. Этот период смены тенденции климатических изменений уже получил название NIATUS – перерыв, разрыв тенденции. Результаты

---

инерционного прогноза концентрации арктического льда с помощью модели общей циркуляции океана INMOM при предписанном атмосферном воздействии, полученном по данным реанализа NCEP (Панин, Дианский, 2015), подтверждают это и показывают тенденцию увеличения ледовитости Арктики.

Ранее уже отмечались циклические особенности климатических изменений полярных зон и предложен сценарий их возможных климатических изменений в XXI столетии, базирующийся на композиции «парникового» и «циклического» эффектов (Панин, 2009, Панин и др., 2009). Согласно этим оценкам также ожидается похолодание в СПЗ, которое может продолжаться вплоть до 2030-х годов. Однако, после этого ожидается новый, более интенсивный разогрев Арктики, вызванный тем, что на антропогенный форсинг наложится положительная фаза цикла естественной долгопериодной изменчивости климата, связанная с колебаниями интенсивности океанической циркуляции Северной Атлантики, а соответственно и процессов, характеризующихся индексом NAAII. Этот разогрев, очевидно, может привести и к значительному увеличению продолжительности навигационного периода СМП, но уже после 2030гг.

Показано, что учет изменчивости указанных индексов, позволяет повторно использовать далее эту информацию для описания вариаций климата ЕЧР, включая климат бассейна Каспийского моря.

Показано, что изменения уровня Каспийского моря, происходившие в XX столетии, согласуются с вариациями интенсивности индексов ATXЦ, NAAII и транспорта влаги. Это позволяет предположить, что, по-видимому, при прогнозировании изменения уровня Каспия учет указанных индексов является определяющим.

То, в какой мере предложенные механизмы в те или иные времена оказывают влияние на климатические изменения должно быть предметом дальнейших углубленных исследований. Однако проведенные исследования свидетельствуют, 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. По крайней мере, можно предположить, что очередная смена тенденций индексов ATXЦ, NAAII и транспорта влаги может произойти примерно через два десятилетия, а поэтому снижение уровня Каспийского моря, происходящее последнее десятилетие, продолжится еще в течение 15-20 лет.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-05-41007 РГО-а) и РНФ (соглашение №14-17-00740). Авторы выражают благодарность Дианскому Н.А. и Гусеву А.В. за проведение экспериментов с INMOM и помочь в подготовке публикации.

---

## Литература

- Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г.С., Мохов И.И., Семёнов В.А., Спорышев П.В. 1999. Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря. Доклады РАН, т. 366, №2, с. 248-252.
- Будыко М.И., Ефимова Н.А., Лобанов В.В. 1988. Будущий уровень Каспийского моря. Метеорология и гидрология, №35, с. 86-94.
- Бышев В.И. Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. 2011. О глобальном характере явления Эль-Ниньо в климатической системе земли. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т.8, №4, с. 200-208.
- Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. 2013. Модель земной системы INMCM4: воспроизведение и прогноз климатических изменений в 19-21 веках. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, т.49, №4, с. 379-490.
- 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.
- Голицын Г.С., Раткович Д.Я., Фортус М.И., Фролов А.В. 1998. О современном подъеме уровня Каспийского моря. Водные ресурсы, т.25, №2, с. 133-139.
- Груда Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. 2008. Изменения климата на территории России: температура воздуха и атмосферные осадки. В кн. Изменение окружающей среды и климата. т.6, с. 11-23.
- Гусев А.В., Дианский Н.А. 2014. Численное моделирование циркуляции Мирового океана и её климатической изменчивости в 1948-2007гг. с помощью модели INMOM. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, т.50, №1, с. 1-13.
- Казанский А.Б. 1994. Возможный подход к прогнозу возрастания уровня Каспийского моря. Доклады Академии наук, т. 338, №4. с. 531-537.
- Мелешко В.П., Катсов В.М., Мирвис В.М, Говоркова В.А., Павлова Т.В. 2008. Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета. Метеорология и гидрология, №8, с. 5-19.
- Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Латиф М., Роекнер Э. 2008. Связь аномалий климата Евразии и Северной Атлантики с есте-

ственными вариациями атлантической термохалинной циркуляции по долгопериодным модельным расчетам. Доклады РАН, т.419, №5, с. 687-690.

Мохов И.И. Смирнов Д.А., Карпенко А.А. 2012. Оценки связи изменений глобальной приповерхностной температуры с различными естественными и антропогенными факторами на основе данных наблюдений. Доклады РАН, т. 443. №2, с. 225-231.

Панин Г.Н. 2009. Об изменениях климата в полярных зонах Земли в XX и XXI столетиях. Доклады РАН, т. 427, №3, с. 397-402.

Панин Г.Н., Т.Ю. Выручалкина, И.В. Соломонова. 2011а. Вариации климата Северной Евразии в последней четверти XX века. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Москва, с. 99-115.

Панин Г.Н., М.Г. Гречушникова, В.В. Пуклаков. 2011б. Адаптация модели тепло-массообмена водоема с атмосферой с учетом эффекта мелководий на примере Иваньковского водохранилища. Водные ресурсы, №6, с. 753-761.

Панин Г.Н., Дианский Н.А. 2014. О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата северной Атлантики. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, т. 50, №3, с. 1-13.

Панин Г.Н. Дианский Н.А. Климатические изменения в Арктике, северной Атлантике и северный морской путь. Доклады РАН, 2015 (в печати).

Панин Г.Н., Мамедов Р., Митрофанов И.В. 2005. Современное состояние Каспийского моря. –М.: Наука, 356 с.

Панин Г.Н., Насонов А.Е., Фокен Т. 2006. Испарение и теплообмен водоема с атмосферой при наличии мелководий. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, т. 42, № 3, с. 367-383.

Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю. 2009. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария. Водные ресурсы, т. 36, №6, с. 743-756.

Попова В.В., Шмакин А.Б. 2006.Динамика климатических экстремумов в Северной Евразии в конце XX века. Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, т. 42, №2, с. 157-166.

Раткович Д.Я. 1993. Современные колебания уровня Каспийского моря. Водные ресурсы, т. 20, №2, с. 160-171.

Семенов В.А. 2008. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике. Доклады РАН, т. 418, №1, с. 106-109.

- Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. 2012. Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия. Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, т. 48, №4, с. 403-421.
- Фролов А.В. 2003. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: Теория и приложения, –М.: ГЕОС, 171с.
- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. 2007. Научные исследования в Арктике, том 2 Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. –СПб.: Наука., 135 с.
- Хон В.Ч., Мохов И.И. 2010. Климатические изменения в Арктике и возможные условия арктической морской навигации в XXI веке. Известия РАН, Физика атмосферы и океана, т. 46, №1, с. 19-25.
- Хубларян М.Г., Найденов В.И. 1994. Нелинейная теория колебаний уровня природных водоемов. В кн.: Воды суши: Проблемы и решения. –М.: ИВП РАН, с. 193-216.
- Delworth T.L., Mann M.E. 2000. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. Clim. Dyn., V.16, pp. 661-676.
- Elguindi N., Giorgi F. 2006. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. Geoph. Res. Letter, V. 33, L08706.
- Gill A.E. 1982. Atmosphere-Ocean Dynamics. Academic Press, New York, 680 p.
- Hurrell J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation // Science. 1995. Vol. 269, pp. 676-679.
- Johannessen L., Bengtsson M.W., Miles S.I., Kuzmina V.A., Semenov G.V., Alekseev A.P., Nagurnyi V.F. 2004 Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability. Tellus, V. 56A, pp. 328-341.
- Jones P.D., M. New, D.E. Parker, S. Martin, and I.G. Rigor. 1999. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. Rev. Geophys., V. 37, pp. 173-199.
- Lenton T.M., Held H., Kriegler E., Hall J.W., Lucht W., Rahmstorf S., and Schellnhuber H.J. 2008. Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, V. 105(6), pp. 1786-1793.
- Leroy S.A.G., Arpe K. 2007. Glacial refugia for summer-green trees

in Europe and South-West Asia as proposed by echam3 time-slice atmospheric model simulations. *Journal of Biogeography*, V. 34, №12, pp. 2115-2128.

Mokhov I.I., Artamonov A.Yu., Bezverkhny V.A., Karpenko A.A., Muryshev K.E., Khon V.Ch., Roeckner E. 2006. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. J. Cote (ed.). Geneva: WCRP. WMO/TD, №1347, Section 7, pp. 23-24.

Panin G.N., Nasonov A. E., Foken Th., Lohse H. 2006. On the parametrisation of evaporation and sensible heat exchange for a shallow lakes. *Theor. Appl. Climat.*, V. 85, №3-4, pp. 123-129.

Schlesinger M.E., Ramankutty N. 1994. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, V. 367, pp. 723-726.

Semenov V.A., Latif M., Dommegård D., Keenlyside N.S., Strehz A., Martin T., Park W. 2010. The Impact of North Atlantic-Arctic Multidecadal Variability on Northern Hemisphere Surface Air Temperature. *J. Climate*, 23, pp. 5668-5677.

Suo L, Ottera O.H., Bentsen M., Gao Y., Johannessen O. 2013. External forcing of the early 20th century Arctic warming. *Tellus*, V. 65, pp. 20578-20591.