УДК 551.583.001.572

# О МЕХАНИЗМЕ КОЛЕБАНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ С ПЕРИОДОМ ОКОЛО 15 ЛЕТ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИ КЛИМАТА ИВМ РАН

© 2020 г. Е. М. Володин\*

Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, ИВМ РАН, Губкина, 8, Москва, 119333 Россия \*e-mail: volodinev@gmail.com

> Поступила в редакцию 09.10.2019 г. После доработки 25.10.2019 г. Принята к публикации 20.11.2019 г.

По данным прединдустриального эксперимента рассматривается механизм колебания климата в Арктике с периодом около 15 лет в модели климата INM-CM5. Для этого применяется техника вычисления вклада различных слагаемых в генерацию энергии колебания и изменение фазы. Показано, что во время положительной фазы колебания (теплая Арктика), отрицательная аномалия температуры и солености имеет место в умеренных широтах Северной Атлантики. Эти аномалии сопровождаются положительным индексом северо-атлантического колебания. Через четверть периода после потепления Арктики потепление и осолонение происходит в умеренных широтах Северной Атлантики. В Северном Ледовитом океане генерация аномалий температуры происходит вследствие усиления адвекции атлантической воды. Эволюция фазы колебания происходит счет переноса тепла из Атлантики и потока тепла на поверхности. Аномалии течений, переносящих тепло из Атлантики в Северный Ледовитый океан, генерируются в основном напряжением трения ветра.

Ключевые слова: климат, колебание, механизм, генерация, фаза, температура, соленость, течения, аномалия

DOI: 10.31857/S0002351520020145

### введение

Из данных наблюдений [1] известно, что климат Арктики и Северной Атлантики испытывает колебания с характерным периодом около 60 лет. Также проявляются и колебания с характерным временем 10-20 лет. Однако, анализировать механизм таких колебаний по данным наблюдений крайне сложно. Имеющийся временной ряд наблюдений в океане слишком короток, а точность и охват недостаточны. В [2] показано, что потепление Арктики начала XXI в. может быть связано с увеличением переноса тепла в высокие широты в атмосфере, но там речь идет лишь о корреляции наблюдаемого потепления и индекса вихревой активности в атмосфере. В [3] показана связь потепления Арктики середины 20 века с индексами декадных колебаний, но и там имеющихся данных недостаточно, чтобы сделать вывод о том, являются ли они причиной, или следствием арктического потепления. В моделях климата естественные колебания температуры в Арктике и Северной Атлантике также проявляются, и это дает дополнительные возможности для диагноза этих колебаний. например, в [4] показано, что малое количество льда в Баренцевом море может быть причиной низкого давления над ним и ветров, которые способствуют проникновению поверхностных течений из Атлантики в Арктику и, следовательно, дальнейшему потеплению. К настоящему времени предложено несколько механизмов естественных колебаний климата в Арктике и северной Атлантике, происходящих в климатических моделях, см., например, [5], [6]. Однако доказать, что в данной климатической модели реализуется именно этот механизм, трудно.

В модели климата INM-CM5 также имеют место колебания климата в Арктике с характерным временем несколько десятков лет. Первая эмпирическая ортогональная функция (ЭОФ) температуры поверхности локализована в Арктике, и спектр ее коэффициента Фурье имеет явно выраженные максимумы на периодах около 60 лет и около 15 лет. Механизм 60-летних колебаний был рассмотрен в [7]. Для этого была применена техника вычисления вклада различных слагаемых в генерацию энергии колебания и эволюцию его фазы. Для исследования 15-летнего колебания также применим эту технику и особое внимание уделим тому, чем механизм 15-летнего колебания отличается от механизма 60-летнего колебания.

## МОДЕЛЬ, ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОД ДИАГНОСТИКИ 15-ЛЕТНЕГО КОЛЕБАНИЯ

Рассматриваются данные численного эксперимента с моделью климата INM-CM5. Модель описана в [8] и имеет блоки динамики атмосферы, динамики океана, аэрозольный блок. В атмосферном блоке разрешение составляет 2 × 1.5 град. по долготе и широте и 73 уровня по вертикали до высоты примерно 60 км. В блоке океана разрешение 0.5 × × 0.25 град. и 40 уровней. Численный эксперимент проводился в режиме прединдустриального климата, когда все воздействия на климатическую систему заданы на уровне 1850 г., что позволяет легче выделять собственные колебания в климатической системе. Эксперимент проводился в рамках сравнения моделей CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 6 [9]). Продолжительность эксперимента составляла 1200 лет. Для последних 200 лет эксперимента были сохранены, кроме обычной выдачи океанского блока, среднемесячные значения всех слагаемых в прогностических уравнениях для температуры, солености и скорости течений. Для анализа 15-летних колебаний из временных рядов всех рассматриваемых переменных были удалены гармоники с периодами меньше 10 лет и больше 20 лет. В качестве индекса колебания I была взята температура поверхности океана в области 0°-80° в.д., 70°-82° с.ш., где первая ЭОФ температуры имеет максимум. Если на поверхности океана лежит лед, то берется именно температура поверхности океана подо льдом, а не температура льда. Из этого временного ряда, как и из всех других, были отфильтрованы гармоники с периодами менее 10 лет и более 20 лет. Были вычислены композиты С различных атмосферных и океанских полей для сдвигов по времени  $\Delta n$  от -7 до +7 лет между рассматриваемым полем и индексом колебания:

$$C_{\Delta n} = \sum_{n=1}^{N} F_{n+\Delta n} I_n / \sqrt{N \sum_{n=1}^{N} I_n^2}$$

Здесь n — номер момента времени (в данном случае номер года), N — количество моментов времени. Вычисленная таким образом  $C_{\Delta n}$  представляет собой среднестатистическую аномалию поля F в год, отстоящий от максимума потепления в Арктике, на  $\Delta n$  лет.

Для диагностики механизма колебания вычислялись вклады слагаемых в генерацию энергии колебания и в эволюцию его фазы. Детально эта техника описана в [10]. Там рассматривается механизм квазидвухлетнего колебания скорости ветра в экваториальной стратосфере и наглядно показано, какие воздействия и в какой мере обеспечивают изменение фазы этого колебания. В принципе, данная техника может быть применена к исследованию колебания любой природы. Применение ее к исследованию механизма 60-летнего колебания климата Арктики по данным модели INM-CM5 приведено в [7]. Здесь лишь кратко суммируем основные идеи.

Пусть для некоторой величины  $\Psi$  решается эволюционное уравнение

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \sum_{j=1}^{J} F_j$$

где *t* — время, *J* — количество слагаемых в правой части. Если разложить левую и правую части этого равенства в ряд Фурье по времени и считать, что энергия колебания для *k*-й гармоники  $E_k$  выражается как  $E_k = \Psi_k^2/2$ , то можно вычислить генерацию энергии *k*-й гармоники *J*-м слагаемым Gj(k), а также вклад Pj(k) в эволюцию фазы колебания. Сумма генерации энергии всеми слагаемыми должна быть равна нулю, а вклад в изменение фазы можно нормировать так, чтобы сумма вкладов от разных слагаемых была равна 1.

В качестве Ч будем рассматривать прогностические переменные модели океана: температуру T, соленость S, горизонтальные компоненты скорости течения U и V. В правой части уравнения для Т в процессе счета модели были сохранены следующие слагаемые: *FT<sub>ADV</sub>* – вклад в изменение температуры адвекции океанскими течениями; *FT<sub>VD</sub>* – вклад вертикальной диффузии, включая потоки на поверхности: поток явного тепла, поток скрытого тепла, длинноволновый радиационный баланс;  $FT_{IS}$  – вклад изопикнической диффузии, FT<sub>RAD</sub> – вклад солнечной радиации. Других слагаемых в уравнении для температуры в модели нет. Солнечная радиация здесь рассматривается отдельно от тепловой, поскольку солнечная частично проникает в воду, а тепловая полностью поглощается поверхностью. Если поверхность океана покрыта льдом, то под потоками тепла на поверхности подразумеваются потоки на границе лед-вода, и эти потоки включают также эффекты, связанные с образованием и таянием льда. Аналогично, для солености имеем слагаемые, описывающие вклад адвекции, вертикальной диффузии и потока на поверхности, и изопикнической диффузии FS<sub>ADV</sub>; FS<sub>VD</sub>; FS<sub>IS</sub>. Потоки на поверхности в слагаемом FS<sub>VD</sub> включают осадки, испарение и влияние на соленость образования и таяния льда. Для U-компоненты скорости течений имеем слагаемые FU<sub>ADV</sub>; FU<sub>VD</sub> (это слагаемое включает в себя и поток на поверхности, то есть в данном случае напряжение трения ветра); *FU<sub>HD</sub>* (вклад горизонтальной диффузии); FU<sub>PC</sub> (вклад градиента давления и силы Кориолиса). Аналогичные слагаемые имеем для И-компоненты скорости. Величины G и P вычисляем по полям композитов со сдвигом по времени для каждого узла модельной сетки, потом осредняем

по высоте, долготе и широте с учетом объема ячейки и в случае P – с учетом энергии колебания, так что суммарная величина G теоретически должна быть равна нулю, а сумма всех P должна быть равна 1. В действительности, однако, суммы могут заметно отличаться от теоретических значений в первую очередь из-за конечной точности машинной арифметики, особенно там, где суммарная тенденция вычисляется в модели как малая разность больших величин. Другой причиной является конечность используемых временны́х рядов для выделения композитов и временны́х гармоник.

### ДИАГНОЗ КОЛЕБАНИЯ В АРКТИКЕ

Рассмотрим композиты полей, характеризующих 15-летнее колебаний: давления на уровне моря, температуры поверхности, солености океана на поверхности, а также скорости течений на поверхности океана в различные фазы колебания. На рис. 1 приведены композиты этих полей за 4 года до максимума индекса колебания, на рис. 2 – композиты за 2 г. до максимума, на рис. 3 – во время максимума, на рис. 4 – через 2 г. после максимума.

За 4 г. (чуть больше четверти периода) до максимума температуры в Арктике почти везде в Северной Атлантике и атлантическом секторе Арктики аномалии температуры поверхности отрицательны, кроме небольшой положительной области в Норвежском море. Аномалии давления похожи на северо-атлантическое колебание (САК), но минимум давления сдвинут к востоку, а максимум к северо-западу от своих обычных положений при высоком индексе САК. Аномалии солености в основном отрицательны в Северной Атлантике и положительны в атлантическом секторе Арктики. Аномалии течений разнонаправленны, но преобладает все же уменьшенный поток атлантической воды в Северный Ледовитый океан (СЛО) вдоль северного побережья Европы.

За 2 г. до максимума температуры в Арктике положительные аномалии температуры порядка 1 град. в Баренцевом и Карском морях, а также на севере Гренландско-Норвежского моря хорошо видны на рис. 2. Аномалия давления почти соответствует положительному индексу САК, с усилением западного переноса вблизи 60° с.ш. Аномалии приповерхностных течений в основном соответствуют аномалии геострофического ветра с учетом экмановского поворота направо. Поток атлантической воды на север и восток в Норвежском и Баренцевом морях больше обычного. Аномалии солености воды на поверхности отрицательны в Северной Атлантике и положительны в Атлантическом секторе СЛО. Во время максимума температуры в Арктике (рис. 3) распределение аномалий похоже на то, что имеет место за 2 г. до этого, то аномалии температуры достигают 1.6-1.8 град., а течения, направленные на север и восток в Норвежском, Баренцевом и Карском морях еще более заметны.

Через 2 г. после максимума температуры Аномалии ТПО в Гренландско-Норвежском, Баренцевом и Карском морях все еще достигают 1 град., но в Северной Атлантике отрицательные аномалии сменяются положительными, аномалии давления невелики и не соответствуют САК, Аномалии скорости течений везде, кроме Гренландско-Норвежского моря, невелики.

Подчеркнем, что на рис. 1-4 представлены композиты среднегодовых аномалий. Если построить такие же композиты, но с учетом годового хода, т.е. отдельно для январей, февралей, и т.д., то для давления и температуры поверхности окажется, что аномалии в зимние месяцы подобны среднегодовым, но больше их по величине в 2-3 раза, а аномалии в летние месяцы, как правило, невелики. таким образом, композиты давления и температуры поверхности определяются в основном зимними месяцами. В то же время, композиты солености и скорости течений для разных месяцев гола ловольно близки к срелнегодовым. Поскольку исследуется процесс с периодом около 15 лет, и вычисление композитов является линейной операцией, то композиты полей, например, через 6 лет после максимума потепления Арктики, близки к композитам, отстоящим на половину периода (7.5 лет), т.е. за 1.5 г. до максимума со знаком минус. Таким образом, максимум отрицательной фазы САК приходится на временной сдвиг по отношению к максимуму потепления в Арктике, равный 6 годам, а еще через 1.5 г. будет иметь место минимум температуры в Арктике.

Композиты для 15-летнего колебания и композиты для 60-летнего колебания похожи между собой тем, что теплой Арктике соответствует положительный индекс САК и более интенсивный чем обычно поток атлантической воды в СЛО. Для обоих колебаний, кроме того, теплой Арктике предшествует более холодная и пресная Северная Атлантика.

Основные отличия от композитов для 60-летнего колебания, состоят в том, что потеплению Арктики не предшествует отрицательная аномалия солености на глубинах от 200 до 1000 м вдоль свала глубин во всем СЛО, которая отмечена в [7]. Для 15-летнего колебания не видно и увеличения потока атлантической воды в СЛО за четверть периода до максимума температуры, которое также отмечено в [7] и связано с аномалией солености на глубинах. Следовательно, механизм генерации энергии и изменения фазы 15-летнего колебания

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56 № 2 2020





(a) 85° N 80° N Λ 75° N 70° N 65° N 60° N 55° N 50° N 45° N 40° N Ю.2 0.3-35° N  $20^{\circ} E 30^{\circ} E 40^{\circ} E 50^{\circ} E 60^{\circ} E 70^{\circ} E 80^{\circ} E$ 60° W 50° W 40° W 30° W 20° W 10° W 0° 10° E (б) 85° N 0.4 140.680° N 0.80.8 75° N 0.670° N 0.265° N -0 60° N 55° N 50° N 45° N 40° N 35° N 60° W 50° W 40° W 30° W 20° W  $0^{\circ}$  $60^{\circ} E 70^{\circ} E 80^{\circ} E$ 10° 10° E 20° E 30° E 40° E 50° E VA (B) 85° N 0.05 -0 80° N 0.05 75° N 70° N 65° N 0.0 60° N 0.155° N 50° N 45° N 40° N-35° N 60° W 50° W 40° W 30° W 20° W 10° W 0° 10° E 20° E 30° E 40° E 50° E 60° E 70° E 80° E **(**г) 85° N 80° N 75° N 70° N 65° N-60° N 55° N 50° N 45° N 40° N 35° N 50° W 40° W 30° W 20° W 10° W 10° E 20° E  $30^{\circ} E 40^{\circ} E$ 60° E 70° E 80° E 50° E 60° W 0° 0.03



ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56 № 2 2020



**Рис. 3.** Композиты аномалии давления на уровне моря, гПа (а), температуры поверхности, К (б), солености на поверхности, промилле (в), скорости течения на поверхности, м/с (г) во время максимума температуры в Арктике.

#### володин

(a) 85° N 80° N 75° N 70° N زا.0 65° N 60° N 55° N 50° N 45° N 60° W 50° W 40° W 30° W 20° W 10° W 00  $10^{\circ} E \ 20^{\circ} E \ 30^{\circ} E \ 40^{\circ} E \ 50^{\circ} E \ 60^{\circ} E$  $70^{\circ} E 80^{\circ} E$ (б) 85° N 0.60.6 0.60.8 80° N 0.8 75° N 20.4 70° N 65° N 0.260° N 55° N 50° N 45° N  $20^{\circ} E 30^{\circ} E 40^{\circ} E 50^{\circ} E 60^{\circ} E 70^{\circ} E 80^{\circ} E$ 40° W 30° W 20° W 10° W 50° W 60° W U0 10° E (B) 85° N  $0.0^{4}$ 0.05 Ω 80° N 75° N 70° N 65° N 60° N 0 55° N 0.05 50° N 45° N 60° W 50° W 40° W 30° W 20° W 10° W 0°  $10^{\circ} E 20^{\circ} E 30^{\circ} E 40^{\circ} E 50^{\circ} E 60^{\circ} E 70^{\circ} E 80^{\circ} E$ **(**г) 85° N ¥ 1 4 7 80° N 75° N 70° N 65° N 60° N 55° N 50° N 45° N 60° W 50° W 40° W 30° W 20° W 10° W  $20^{\circ} E 30^{\circ} E 40^{\circ} E 50^{\circ} E$ 60° E 70° E 80° E 0° 10° E 0.03



ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56 № 2 2020

#### володин

Таблица 1.	Вклад различных слагаемых в генерацию энергии G и изменение фазы P колебания температуры T
солености .	$S$ и скорости течения $U, V$ в Арктике в области $70^\circ - 82^\circ$ с.ш., $0^\circ - 80^\circ$ в.д., $0 - 100$ м. Обозначения слага-
емых см. в	разделе "Модель, численный эксперимент и метод диагностики 15-летнего колебания"

I I I I I I I I I I I I I I I I I I I					
		FT <sub>ADV</sub>	FT <sub>VD</sub>	FT <sub>IS</sub>	FT <sub>RAD</sub>
Т	$G, 10^{-10} \mathrm{K^2/c}$	4.48	-5.29	-1.21	2.27
	Р	0.44	0.46	0.01	0.01
		FS <sub>ADV</sub>	FS <sub>VD</sub>	FS <sub>IS</sub>	
S	$G, 10^{-12}\% c^{2}/c$	6.1	-5.9	0.1	
	Р	0.77	0.17	0.00	
		FU <sub>ADV</sub> , FV <sub>ADV</sub>	FU <sub>VD</sub> , FV <sub>VD</sub>	$FU_{HD}$ , $FV_{HD}$	$FU_{PC}, FV_{PC}$
<i>U</i> , <i>V</i>	$G, 10^{-10} \mathrm{m}^2 / \mathrm{c}^3$	-0.8	12.6	-10.8	-1.1

должен быть в чем-то похожим, и чем-то отличаться от механизма 60-летнего колебания. Чтобы понять, в чем именно состоят сходства и отличия, рассмотрим вклад различных слагаемых в генерацию энергии 15-летнего колебания и изменение его фазы (табл. 1). Все расчеты были осреднены по области 70°-82° с.ш., 0°-80° в.д., 0-100 м, где колебание имеет максимальную амплитуду в температуре.

Перенос океанскими течениями вносит самый большой вклад в генерацию аномалий температуры. Вклад солнечного излучения также положителен и примерно в два раза меньше по величине, чем вклад переноса. Это можно интерпретировать как то, что аномалии температуры в основном генерируются аномалиями адвекции, а солнечное излучение играет роль дополнительной положительной обратной связи: при потеплении Арктики площадь льда уменьшается, и это приводит к большему поглощению солнечного излучения поверхностью. Вклад в генерацию аномалий температуры вертикальной диффузии и потоков с поверхности отрицателен, и в основном именно это слагаемое компенсирует положительные слагаемые. Это значит, что при арктическом потеплении океан отдает больше тепла атмосфере. Вклад изопикнической диффузии отрицателен. Все выводы о генерации аномалий температуры качественно такие же, как и для 60-летнего колебания.

Изменение фазы колебания температуры происходит под воздействием слагаемых переноса и потоков с поверхности. Изменение фазы 60-летнего колебания происходит под действием только переноса, а вклад потоков с поверхности отрицателен. То есть для 15-летнего колебания при переходе от холодной фазы к теплой атмосфера теплеет немного раньше, и потоки тепла из атмосферу в океан вносят вклад в изменение фазы колебания в океане.

Для солености, как и в случае 60-летнего колебания, перенос вносит основной вклад в генерацию аномалий и в эволюцию фазы.

Анализ вкладов в генерацию горизонтальных течений показывает, что единственным положительным слагаемым является вклад напряжения трения ветра и вертикальной диффузии, т.е. аномалии течений, которые генерируют колебания температуры, являются в верхнем 100-метровом слое чисто ветровыми. Для 60-летнего колебания напряжение трения ветра также вносит основной вклад в генерацию течений, но существенен также и вклад градиента давления.

Вклад основных механизмов в поддержание 15-летнего колебания температуры в Арктике иллюстрирует рис. 5, где изображены композиты температуры поверхности, слагаемого переноса температуры, потока явного тепла из атмосферы в океан, а также индекса САК. Для того, чтобы использовать одну и ту же шкалу, все данные нормированы на среднеквадратичное отклонение. Температура имеет максимум в момент времени 0. Слагаемое переноса опережает по фазе температуру примерно на 1.5 г. Оно почти максимально при максимальной температуре, т.е. дает положительный вклад в генерацию, а опережение по фазе дает вклад в эволюцию фазы. Поток явного тепла находится почти в противофазе с температурой; когда температура максимальна, он почти минимален, что означает отрицательный вклад в генерацию. В то же время, минимум потока имеет место на 1 г. позже, чем максимум температуры, что обеспечивает положительный вклад этого слагаемого в эволюцию фазы. На этом же рисунке приведен и временной ход индекса САК, определенного как разность давлений в области 40° з.д.-4° в.д., 35°-45° с.ш.-40° з.д.-60° в.д., 65°-80° с.ш. Индекс САК опережает по фазе температуру в Арктике на 1-2 г. и находится почти в фазе с аномалией переноса тепла течениями. Это можно интерпретировать как то, что напряжение трения связанное с аномалиями САК быстро генерирует



**Рис. 5.** Композиты температуры поверхности (жирная линия без меток), нагревания воды в слое 0–100 м вследствие потока явного тепла из атмосферы (линия с квадратами), нагревания воды в слое 0–100 м вследствие адвекции температуры течениями (линия с кружками) в области 70°–82°с.ш., 0°–80° в.д., а также индекс САК (линия с крестами) при временны́х сдвигах от -7 до 7 лет по отношению к индексу *I*. Все величины нормированы на среднеквадратичное от-клонение.

ветровые течения, которые переносят тепло в Арктику. Положительный индекс САК обеспечивает также перенос более теплого воздуха в атмосфере при переходе от холодной Арктики к теплой, что приводит к сдвигу между максимумом температуры и минимумом потока явного тепла в океан.

### ДИАГНОЗ КОЛЕБАНИЯ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

Приведем также результаты для генерации аномалий температуры, солености и скоростей в

приповерхностном слое до 100 м в северной Атлантике ( $60^{\circ}-0^{\circ}$  з.д.,  $45^{\circ}-62^{\circ}$  с.ш., табл. 2). Основным слагаемым, дающим вклад в генерацию аномалий температуры и эволюцию фазы колебания, является перенос течениями. Этот результат отличается от аналогичных данных для 60-летнего колебания, где в генерацию и изменение фазы температуры в Атлантике вносят соизмеримые вклады несколько слагаемых.

Для солености основной вклад в генерацию аномалий вносит поток на поверхности. Это можно интерпретировать как то, что когда вода

		FT <sub>ADV</sub>	FT <sub>VD</sub>	FT <sub>IS</sub>	FT <sub>RAD</sub>
Т	$G, 10^{-10} \mathrm{K^2/c}$	2.50	-2.16	-0.54	0.12
	Р	0.85	-0.02	0.04	0.01
		FS <sub>ADV</sub>	FS <sub>VD</sub>	FS <sub>IS</sub>	
S	$G, 10^{-12}\% c^{2}/c$	-0.76	4.68	-2.52	
	Р	0.86	-0.02	0.05	
		$FU_{ADV}, FV_{ADV}$	$FU_{VD}, FV_{VD}$	$FU_{HD}, FV_{HD}$	$FU_{PC}, FV_{PC}$
<i>U</i> , <i>V</i>	$G, 10^{-10} \mathrm{m}^2/\mathrm{c}^3$	2.6	56.7	-15.4	-43.7

**Таблица 2.** Вклад различных слагаемых в генерацию энергии *G* и изменение фазы *P* колебания температуры *T*, солености *S* и скорости течения *U*, *V* в Северной Атлантике в области  $45^{\circ}-62^{\circ}$  с.ш.,  $60^{\circ}-0^{\circ}$  з.д., 0-100 м



**Рис. 6.** Композит аномалии меридиональной функции тока в Атлантике (Св) за 2 г. до максимума температуры в Арктике.

более холодная, чем в среднем, она меньше испаряет, и именно этот механизм поддерживает отрицательную аномалию солености в Атлантике на  $50^{\circ}-62^{\circ}$  с.ш., изображенную на рис. 1–3. В то же время, южнее  $50^{\circ}$  с.ш. при нулевом сдвиге по времени положительная аномалия температуры приводит к большему испарению, которое поддерживает положительную аномалию солености, которая при сдвиге по времени +2 г. появляется и севернее. Изменение фазы колебания солености происходит вследствие переноса. Основным слагаемым, обеспечивающим генерацию приповерхностных течений в Северной Атлантике, является напряжение трения ветра, т.е. течения являются чисто ветровыми. Это хорошо согласуется с данными рис. 1–4, где течения в Северной Атлантике, как правило, повернуты относительно геострофического ветра вправо на угол порядка 30°.

С 15-летним колебанием, в отличие от 60-летнего, связаны заметные аномалии меридиональной циркуляции в Северной Атлантике. Аномалии меридиональной функции тока максимальны по величине за 1-2 г. до максимума температуры в Арктике (рис. 6) и соответствуют максимуму индекса САК. Максимум функции тока около 0.5 Св расположен на глубине около 1500 м на 35° с.ш., опускание происходит на  $40^\circ$ - $50^\circ$  с.ш., а подъем – южнее  $30^\circ$  с.ш. Такая структура близка к первой ЭОФ меридиональной функции тока, полученной для большинства климатических моделей в [11]. В [12] показано, что такая структура возбуждается, если в численном эксперименте искусственно вносить возмущение в напряжение трения ветра, соответствующее САК, в виде колебания с периодом 10 лет. В этом случае положительному индексу САК тоже соответствует увеличение меридиональной циркуляции около 35° с.ш. В [13] показано, что экмановские вертикальные скорости, порождаемые аномалиями САК, близки к полным вертикальным скоростям, и поэтому аномалии меридиональной циркуляции, связанные с индексом САК в основном порождаются напряжением трения ветра и дивергенцией ветровых течений. Поэтому и в нашем случае аномалия меридиональной функции тока обусловлена, по-видимому, аномалией напряжения трения, но для прямого доказательства этого нужна дополнительная диагностика.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным прединдустриального численного эксперимента с моделью климата INM-CM5 проведено исследование колебания климата в Арктике с периодом около 15 лет. Показано, что в Арктике генерация аномалий температуры обеспечивается переносом тепла океанскими течениями и, в меньшей степени, поглощением солнечной радиации. Изменение фазы колебания происходит примерно в равной степени за счет переноса тепла океанскими течениями и за счет потока тепла из атмосферы в океан, прежде всего потока явного тепла. В свою очередь, аномалии течений генерируются напряжением трения ветра. Индекс САК достигает максимума за 1–2 г. до максимума температуры в Арктике. Связанное с этим напряжение трения генерирует течения, которые приносят больше атлантической воды в СЛО и приводят к максимуму температуры.

В Северной Атлантике аномалии течений, связанные с 15-летним колебанием, также являются ветровыми. Генерация аномалий температуры и эволюция фазы колебания температуры происходит там за счет аномалии переноса тепла океанскими течениями. За 2 г. до максимума температуры в Арктике имеет место также максимум мериодинальной функции тока в Атлантике вблизи 35° с.ш.

Неясным остается вопрос о том, являются ли аномалии давления, соответствующие разным фазам колебания, откликом атмосферы на соответствующие аномалии ТПО? Очевидно, ответить на этот вопрос можно только после проведения дополнительных численных экспериментов.

Работа выполнена в ГОИН, грант 17-17-01295 (анализ механизма колебаний в Арктике). Анализ механизма колебаний в северной Атлантике выполнен при поддержке РФФИ, грант 17-05-00628. Численный эксперимент проведен в Межведомственном суперкомпьютерном центре РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Moore G.W., Halfar J., Majeed H., Adey W., Kronz A. Amplification of the Atlantic multidecadal oscillation associated with the onset of the industrial era warming // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 40861.
- 2. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 6–21.
- 3. *Малинин В.Н., Вайновский П.А.* О причинах первого потепления Арктики в XX столетии // Ученые записки РГГМУ. Метеорология. № 53. С. 34–55.
- 4. *Semenov V.A., Latif M.* The early twentith century warming and winter Arctic sea ice. The Cryosphere. 2012. V. 6. C. 1231–1237.

- Delworth T., Manabe S., Stouffer R.J. Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled atmosphere-ocean model // J. Climate. 1993. V. 6. P. 1993–2011.
- Frankcombe L.M., Dijkstra H.A. The role of Atlantic Arctic exchange in North Atlantic multidecadal climate variability // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. 16603/1–16603/5.
- Volodin E.M. The nature of 60-year oscillations of the Arctic climate according to the data of INM RAS climate model // Russ. J. Numer. Math. Modelling. 2018. V. 33. № 6. P. 359–366.
- Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лыкосов В.Н., Грицун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 164–178.
- Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 1937–1958.
- Володин Е.М. Оценка вклада различных механизмов в эволюцию фазы квазидвухлетнего колебания по результатам климатического моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 35–40.
- 11. *Gritsun A.S.* Low frequency variability and sensitivity of the Atlantic meridional overturning circulation in selected IPCC climate models // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2018. V. 33. № 6. P. 341–350.
- 12. *Bellucci A., Richards K.J.* Effect of NAO variability on the North Atlantic Ocean circulation // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L02612.
- Huang B., Hu Z., Schneider E., Wu Z., Xue Y., Klinger B. Influences of tropical-extratropical interaction on the multidecadal AMOC variability in the NCEP climate forecast system // Climate Dynamics. 2012. V. 39. P. 531–555.

# The Mechanism of Arctic Climate Oscillation with Period of 15 Years in Data of Climate Model of INM RAS

# E. M. Volodin\*

Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, INM RAS, Gubkina, 8, Moscow, 119333 Russia \*e-mail: volodinev@gmail.com

Mechanism of Arctic climate oscillation with period of 15 years is studied on the basis of INM-CM5 climate model data. For this, technique of generation and phase evolution estimation for different terms is applied. It is shown, that during positive phase of oscillation (warm Arctic) negative anomaly of temperature and salinity in North Atlantic midlatitudes happen. These anomalies are associated with positive North Atlantic Oscillation index. A quarter of period after warm Arctic, warming and salinity increase appears also in North Atlantic midlatitudes. In Arctic ocean, anomaly of temperature are generated mainly by enhanced advection of Atlantic water. Advection and surface heat fluxes give main impact to evolution of oscillation phase. Anomalies of oceanic currents responsible for advection of Atlantic water to Arctic ocean are generated mainly by surface wind stress.

Keywords: climate, oscillation, mechanism, generation, phase, temperature, salinity, currents, anomaly