

АРКТИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Г.В. Алексеев

Арктический и антарктический институт Росгидромета

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

- Арктическая часть глобальной климатической системы
- Энергетический баланс Арктики

НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

- Приповерхностная температура воздуха
- Атмосферная циркуляция
- Солнечная радиация
- Морской ледяной покров
- Морская среда

ДИНАМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

- Роль циркуляции атмосферы и океана в формировании изменений глобального и арктического климата
- Индексы влияния зонального и меридионального переноса тепла
- Вклад переносов в потепление
- Арктическое усиление

МОРСКОЙ ЛЕД В ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ КЛИМАТА

ВЫВОДЫ

ВВЕДЕНИЕ

Арктическая часть глобальной климатической системы

Климат Арктики формируется в условиях значительно меньшего притока тепла от Солнца, чем климат неполярных областей. В значительной части этот дефицит восполняется внутренними термодинамическими процессами, протекающими как в климатической системе в целом, так и в морской Арктике (рис. 1). Значительный вклад в потепление арктического климата по сравнению с гипотетическим климатом при неподвижной и прозрачной атмосфере, вносит адвекция тепла по направлению к полюсу.

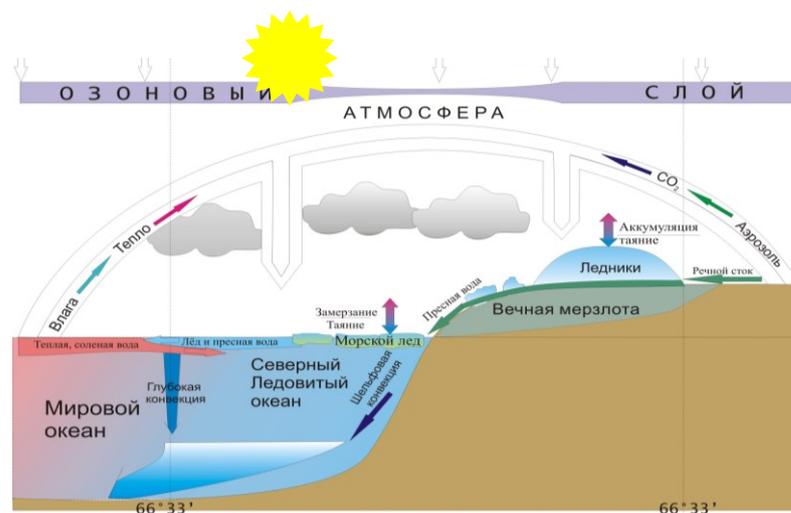


Рисунок 1. Арктическая часть глобальной климатической системы (Алексеев, 2003)

В морской Арктике изменения климата усиливаются обратными связями, среди которых особое внимание привлекает деградация морских льдов в Северном Ледовитом океане (СЛО), остро реагирующих на изменения климата. Вынос пресной воды из СЛО влияет на распространение морских льдов, термохалинную циркуляцию в прилегающей акватории Северной Атлантики и через них на региональный и глобальный климат.

Энергетический баланс Арктики

Как показывают оценки [Марчук и др., 1988; Nakamura and Oort, 1988; Хрол, 1992; Serreze et al., 2007], адвекция составляет основную часть энергетического баланса для климатической системы Земля - атмосфера в высоких широтах Северного полушария. Отрицательная адвекция в океане летом является результатом поглощения тепла на таяние льда и снега и на прогрев верхнего опресненного слоя. Недавние оценки составляющих энергетического баланса с использованием массивов реанализа атмосферных данных ERA-40 и NCEP/NCAR для области севернее 70° с.ш. (Serreze et al., 2007) показали несколько меньший вклад адвекции в атмосфере и больший приток из океана в связи с сокращением площади морских льдов и увеличением летнего прогрева верхнего слоя океана.

НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Температура воздуха

В высоких широтах Северного полушария развитие потепления в 1910-1940 гг. прервано глубоким понижением ПТВ до 1970-х гг., после которого началось современное потепление (рис. 2). Эти три стадии эволюции ПТВ образуют колебание с периодом 60-70

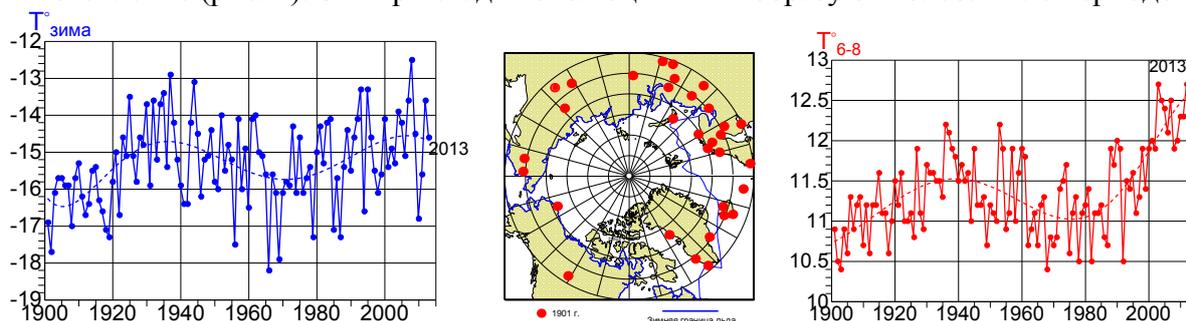


Рисунок 2. Средняя по 32 станциям к северу от 60° с.ш. ПТВ зимой и летом. В центре – положение станций (адаптирован из Алексеев и др., 2011).

лет (Schlesinger and Ramankutty, 1994), наиболее заметное в области Северной Атлантики и прилегающей суши. По этой причине его часто называют Атлантической междесятилетней осцилляцией (АМО) (Enfield et al., 2001). В многолетних изменениях ПТВ в Арктике на долю этого колебания приходится 37% изменчивости среднегодовой ПТВ. Наибольший вклад (от 22 до 45%) отмечается на станциях в Гренландско/Исландском районе, который и формирует в значительной степени вклад АМО в изменения средней температуры в Арктике.

Изменения температуры воздуха над областью морской Арктики, включающей покрытую льдами в зимний период акваторию Северного Ледовитого океана (СЛО) представляют особый интерес, поскольку, в первую очередь влияют на летнее таяние и зимнее разрастание ледяного покрова в СЛО. На рис. 3 видно быстрое убывание отрицательных температур после 1991 года и быстрый рост положительных температур после 1996 года с абсолютным рекордом в 2012 году.

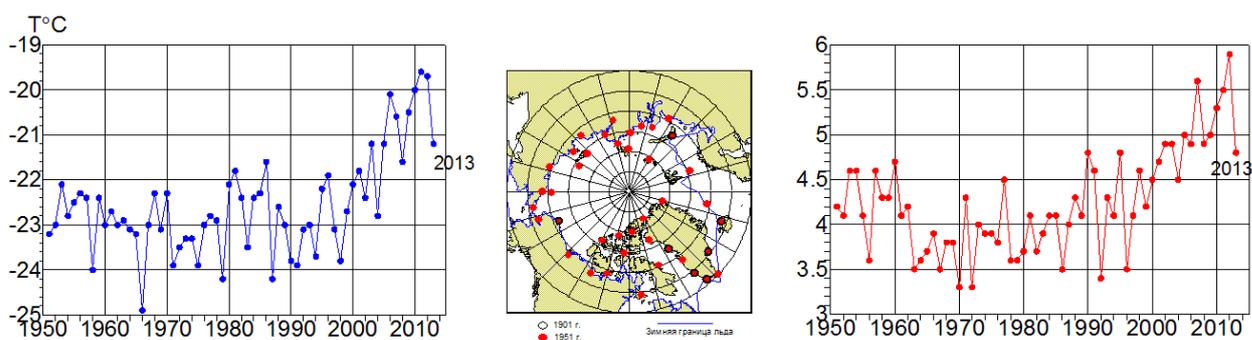


Рисунок. 3. Изменения средней температуры воздуха в морской Арктике за 1951-2013 гг. Слева – зимой (ДЯФ), справа – летом (ИИА). В центре – положение станций (адаптирован из Алексеев и др., 2011).

Атмосферная циркуляция

Влияние атмосферной циркуляции на изменения климата в Арктике несомненно виду большого вклада атмосферных переносов в формирование ее энергетического баланса. Недавняя перестройка циркуляционной системы в Арктике проявилась в формировании дипольной структуры (Wu et al., 2006; Wang et al., 2009) в поле давления воздуха на уровне моря (ДУМ). В положительной фазе арктический диполь (АД) характеризуется пониженным давлением над Карским морем и морем Лаптевых и повышенным над Канадским архипелагом, распространяющимся на юго-восток Гренландии. В летние сезоны 2007-2012 гг. положительная фаза диполя сопровождалась увеличением летнего таяния и выносом льда. Изменение в структуре атмосферной циркуляции над Арктикой с преобладанием циклонического режима повлияло на формирование климатических аномалий над прилегающими умеренными широтами, в частности аномально холодных зим в Европе и в восточной Азии (Petoukhov, Semenov, 2010; Inoue et al., 2012).

Солнечная радиация

Потепление в Арктике связано также с изменениями в режиме проходящей солнечной радиации. Наблюдения за проходящей солнечной радиацией на арктических станциях обнаруживают значимые тренды ее составляющих за последние 50 лет. Суммарная радиация выросла, главным образом, в мае и июне (Weston et al., 2007). Одной из причин является увеличение нисходящей длинноволновой радиации (ДВР), которая уменьшает альбедо и способствует более раннему началу таяния. С 1979 по 2005 год количество поглощенной солнечной радиации, запасенной летом в верхнем слое Арктического бассейна увеличилось на 89% его акватории (Perovich et al., 2007).

О влиянии облачности на радиационный режим в Арктике можно судить по оценкам трендов ПТВ при различных условиях облачности. Облака повышают ПТВ почти круглый год за исключением середины лета. Тренды ПТВ при ясном и облачном небе распределены также как при общих условиях облачности, но величина трендов при ясном небе больше, чем при облачном и они положительны весной, летом и осенью. Тренды при общих условиях облачности показывают потепление в большинстве районов весной и летом (Liu et al., 2008).

Морской ледяной покров

Сокращение площади морского льда является наиболее обсуждаемым проявлением современного потепления в Арктике. Наиболее ранние оценки распространения льдов относятся к акватории Гренландского, Норвежского и Баренцева морей и прилегающих районов (Vinje, 2001; Brinck Løyning et al., 2003). Из них видно, что в период с 1920-х по

1940-е годы происходило сокращение летней площади льда в области от 30° W до 70° E и к югу от 80° N. Данные о летней площади льда в Сибирских арктических морях имеются в виде ледовых карт с 1933 года (Mahoney et al., 2008). Ряды средней в летние месяцы площади льда восстановлены с 1924 года (Захаров, 2004; Фролов и др., 2007).

Современный период сокращения площади арктического морского льда хорошо документирован по данным измерений со спутников. Произведенные на их основе комплекты ледовых карт и временные ряды различных характеристик морского ледяного покрова показывают изменения площади, занятой льдами в Арктике. В последнее полтора десятилетия происходило ее быстрое сокращение в конце летнего периода, завершившееся самым глубоким минимумом в сентябре 2012 года (3.37 млн. кв. км при среднем значении более 6 млн. (рис. 4)).

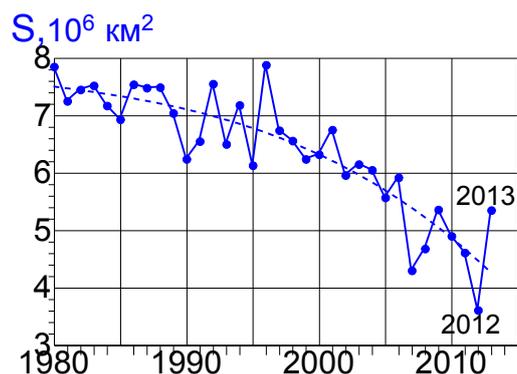


Рисунок 4. Средняя площадь морского льда в сентябре в Арктике по данным NSIDC (http://nsidc.org/data/seaice_index/index.html) в 1980-2013 гг. Пунктирная кривая – аппроксимация полиномом 3 степени.

Толщина льда

Толщина льда является наиболее трудным для массовых измерений параметром морского ледяного покрова. На основе обобщения данных, собранных ПЛ в Арктическом бассейне найдено уменьшение средней по бассейну толщины льда на 42% к середине 1990-х годов относительно средней за 1958-1977 годы (Rothrock et al., 1999). Сравнительный анализ данных попутных измерений в 1977, 1987 и 2000-х гг. показал сокращение доли многолетних льдов в 2-3 раза и, соответственно, уменьшение средней их толщины в Арктическом бассейне к 2005-2006 годам на 23% (рис. 5).

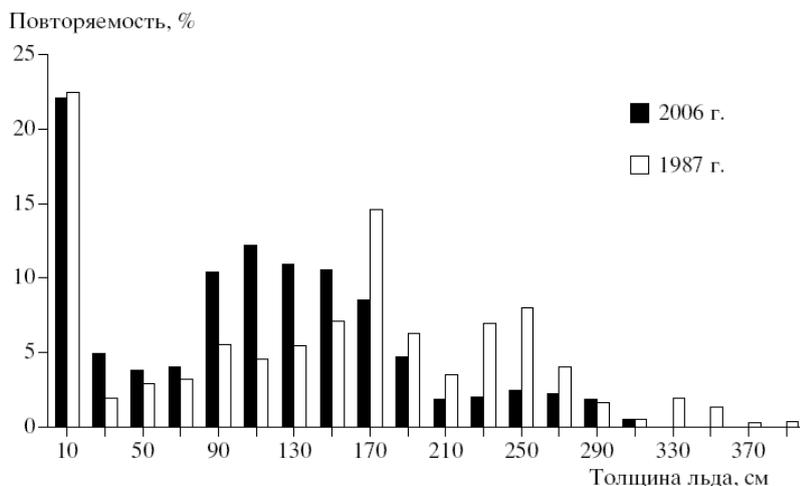


Рисунок 5. Распределение толщины ровного льда в мае на пути плавания атомного ледокола «Ямал» в 2006 г. и атомного ледокола «Сибирь» в 1987 г.

Недавно Laxon et al. (2013), используя новые данные о толщине льда, полученные со спутника CryoSat-2, оценили объем льда для зимы 2010/11 и 2011/12 гг. Сравнение с ранней (2003-2008) оценкой по данным спутника ICESat, показало, что осенью объем льда уменьшился на 4292 км³, а зимой на 1479 км³.

Факторы, влияющие на деградацию морского ледяного покрова

Очевидно, что причина резкого сокращения количества арктических льдов в конце летнего периода связана с потеплением климата. Корреляция между изменениями летней приповерхностной температуры воздуха и площадью, занятой морским льдом в сентябре за 1979-2013 гг. составляет -0.93. Оценки (Кулаков и др., 2012) на основе моделирования изменений летней ПМЛ под влиянием потепления и атмосферной циркуляции подтвердили, что сокращение ПМЛ в последние десять лет обусловлено, главным образом, повышением температуры воздуха. Изменения циркуляции атмосферы также повлияли на сокращение льда (Bengtsson et al., 2004; Maslanik et al., 2007; Ogi et al., 2008; Wang et al., 2009; Stroeve et al., 2011), вследствие увеличения экспорта льда через пролив Фрама в конце 1980-х – начале 1990-х гг.

Летнее таяние арктического морского льда в сильной степени зависит от распределения приходящей солнечной радиации между отраженной и поглощенной льдом и океаном частями. При этом количество поглощенной солнечной радиации системой лед-океан зависит от начала таяния и слабо связаны с продолжительностью таяния или окончанием таяния. Начало таяния столь сильно влияет потому, что на это время приходится максимум в притоке солнечной радиации и отклонения этого момента сказываются на всем периоде таяния через влияние на альбедо. Важную роль играет рост приходящей на поверхность длинноволновой радиации вследствие увеличения влажности и облачности в арктической атмосфере, а также сдвиг от многолетнего к однолетнему льду с меньшим альбедо.

Вопрос о влиянии на деградацию морского ледяного покрова в Арктике повышения температуры в подповерхностном слое воды в Арктическом бассейне остается предметом обсуждения (Timmermans et al., 2008; Shaw et al., 2009; Lenn Y.D. et al., 2009).

Среди последствий сокращения площади льда в Арктике следует отметить влияние на баланс CO₂ в арктической атмосфере. Увеличение пространства открытой воды летом в арктических морях способствует поглощению CO₂ из атмосферы (Semiletov et al., 2004). Зимой этот процесс продолжается посредством стока рассола, содержащего CO₂ из атмосферы, в подледный слой воды при образовании морского льда (Anderson et al., 2004). Недавно был зафиксирован противоположный поток CO₂ с поверхности нарастающего морского льда в атмосферу в результате реакции в рассоле при определенной температуре, которая сопровождается выделением CO₂ (Недашковский, Макштас, 2010; Miller et al., 2011). Эти результаты подтверждают предположение о росте амплитуда сезонных колебаний концентрации CO₂ в атмосфере над Арктическим бассейном в результате увеличения объема формирования морского льда зимой (Алексеев, Нагурный, 2007).

Морская среда

Океанографические данные за период наблюдений в арктических водах собраны в базе океанографических данных ААНИИ <http://www.aari.nw.ru/projects/ECIMOt/ocean/>. Они были использованы, в частности, для составления климатических цифровых океанографических атласов Северного Ледовитого океана для зимнего (EWG, 1997) и летнего (EWG, 1998) сезонов. Для мониторинга климата наиболее репрезентативны изменения содержания пресной воды в верхнем слое и температуры воды атлантического происхождения в промежуточном слое Арктического бассейна. Первое характеризует потенциал арктического влияния на климат, второе показывает состояние океанического конвейерного пояса, доставляющего теплую и соленую воду из низких широт.

ДИНАМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Роль циркуляции атмосферы и океана в формировании изменений глобального и арктического климата

Циркуляция атмосферы и океана являются важнейшими внутренними процессами в климатической системе Земли, участвующими в формировании климата и его изменчивости. Многочисленные исследования, начатые еще в 1930-е годы, показали важную роль атмосферной циркуляции в развитии региональных колебаний климата, в частности, потепления Арктики в 1930-40-е годы [Визе, 1937; Виттельс, 1946; Дзердзеевский, 1943; Гирс, 1966; Bengtsson et al., 2004] и в современный период [Алексеев, 2004; Proshutinsky and Johnson, 1997; Dickson et al., 2000; Zhang et al., 2008]. Во многих работах были предложены индексы для оценки влияния атмосферной циркуляции, прежде всего ее зональной составляющей, на колебания погоды и климата [Блинова, 1943; Вангенгейм, 1946; Дзердзеевский, Монин, 1954; Груза, 1965; Rossby, 1939; Thompson and Wallace, 1998; Hurrell et al., 2003].

Влияние зональной циркуляции на погоду и климат связано с огромной разностью в теплоемкости океана и атмосферы и с накоплением тепла в верхнем слое океана летом и последующей его передачей в атмосферу зимой. В результате обеспечивается отепляющее воздействие переносов тепла и влаги из океанических областей на погоду и климат континентальных областей и формируются их колебания вследствие изменчивости атмосферной циркуляции [Семенов, 1960; Марчук, Скиба, 1976; Николаев, 1981; Van Loon and Williams, 1976; Hurrell and van Loon, 1997]. Отепляющий эффект не ограничивается областью, в которой сосредоточен зональный перенос с океана на континент, но проявляется как в средней температуре всего Северного полушария и так и глобальной средней температуре [Алексеев и др., 1991; Алексеев, Священников, 1991; Алексеев, 2004; Alekseev, Podgorny, 1992; Wallace et al., 1995; Wallace et al., 1996].

Исследованию влияния на климат меридиональной составляющей переносов тепла и ее изменчивости под влиянием внутренней динамики атмосферы и естественных и антропогенных воздействий, уделялось особое внимание. Многие важные результаты в этом направлении были получены с использованием энергобалансовых моделей среднезонального климата (ЭБМ), предложенными М.И. Будыко [Budyko, 1969] и В. Селлерсом [Sellers, 1969]. На них были воспроизведены наблюдаемые широтные распределения дисперсий среднезональных температур с полярным усилением, возбуждаемые колебаниями меридионального переноса тепла (МПТ) [Демченко, 1984; North, 1982], включая перенос скрытого тепла [Flannery, 1984], показано влияние МПТ на чувствительность климатической системы к внешним воздействиям и рост МПТ с потеплением [Васюта и др., 1989; Демченко, Зубарев, 1989], что согласуется с эмпирическими данными о росте вихревой активности в атмосфере при потеплении и ее ослаблении при похолодании [Мохов и др., 1992; Agee, 1991].

В то же время в экспериментах с ЭБМ не было отмечено влияния МПТ на среднюю температуру, которая оставалась неизменной в диапазоне изменений МПТ от полного отсутствия до мгновенного выравнивания контрастов температуры между экватором и полюсом [North et al., 1981]. Такой результат является следствием линейного приближения для параметризации УДР, которое позволяет воспроизвести многие характеристики климата [Будыко, 1974; Мохов, Петухов, 1978; North et al., 1981], но противоречит распределению дисперсии среднезональных значений измеряемого УДР. В работах [Алексеев, 1982; Алексеев и др., 1990; Алексеев, Священников, 1991; Alekseev, Podgorny, 1990] показано, что нелинейная зависимость УДР от температуры приводит к повышению средней температуры при усилении МПТ при этом средние потери тепла с УДР остаются неизменными.

Индексы влияния зонального и меридионального переноса тепла

При усилении как зонального, так и меридионального переносов тепла пространственные контрасты ПТВ уменьшаются и, наоборот, при ослаблении переносов возрастают. На этом основании были предложены (Алексеев и др., 1990, 1991) индексы для оценки влияния колебаний переносов на среднюю ПТВ в отдельных широтных зонах, на полушарии и на глобусе. Индекс зонального переноса

$$D_Z = \frac{1}{2\pi(\sin\varphi_2 - \sin\varphi_1)} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos\varphi \int_0^{2\pi} (T_{\varphi\lambda} - T_\varphi)^2 d\lambda d\varphi$$

характеризует неоднородность распределения ПТВ вдоль кругов широты в области $[\varphi_1, \varphi_2]$. Индекс для меридионального переноса

$$D_M = \left\langle (T_\varphi - \langle T_\varphi \rangle)^2 \right\rangle_\varphi, T_\varphi = \langle T_{\varphi\lambda} \rangle_\lambda, \langle T_\varphi \rangle = \langle T_\varphi \rangle_\varphi$$

– неоднородность вдоль меридиана от экватора до полюса, индекс совместного влияния переносов $D = (D_Z + D_M)^{\frac{1}{2}}$. Средние квадраты отклонения ПТВ от соответствующих средних входят в определение доступной потенциальной энергии в атмосфере (Лоренц, 1970; Ван Мигем, 1977).

В таблице 1 приведены оценки корреляции индексов и средней ПТВ в разные сезоны за 1948–2009 гг., рассчитанные по данным NCEP (Н) и по модели ECHAM (М). Дополнительно рассчитана корреляция между ПТВ и индексами NAO и АО.

Таблица 1 – Корреляция между индексами D_Z , D_M , D , NAO, АО и средней ПТВ в разных областях и сезонах по данным NCEP (Н), модели ECHAM (М)

индекс	32.5 – 65.5° с.ш.				67.5 – 87.5° с.ш.				Северное полушарие				
	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	Зима	Весна	Лето	Осень	
D_Z	Н	-0.84	-0.53	0.48	-0.60	-0.26	-0.26	0.17	-0.13	-0.66	-0.49	0.50	-0.40
	М	-0.73	-0.48	0.31	-0.53	0.14	0.08	0.15	0.06	-0.42	-0.26	0.15	-0.33
D_M	Н	-0.68	-0.69	-0.66	-0.78	-0.83	-0.91	-0.70	-0.86	-0.66	-0.62	-0.19	-0.78
	М	-0.51	-0.55	-0.39	-0.34	-0.68	-0.72	-0.39	-0.69	-0.41	-0.43	0.30	-0.15
D	Н	-0.83	-0.76	-0.28	-0.84	-0.50	-0.52	-0.29	-0.59	-0.77	-0.71	0.06	-0.76
	М	-0.77	-0.64	-0.21	-0.48	-0.41	-0.61	-0.29	-0.58	-0.53	-0.45	0.35	-0.23
NAO	0.40	-0.06	-0.15	-0.09	0.40	0.05	-0.41	-0.17	0.30	-0.0	-0.21	-0.17	
АО	0.41	0.28	0.18	0.26	0.27	0.15	-0.12	0.0	0.20	0.14	0.01	0.08	

Из таблицы видно преимущество предложенных индексов для оценки влияния переносов на среднюю ПТВ во всех рассмотренных областях. Рассчитанные по данным модели новые индексы и ПТВ также связаны между собой, хотя и слабее. Кроме того, индексы показывают согласованные с ПТВ тренды, свидетельствующие об усилении роли циркуляции атмосферы в развитии потепления.

Количественные оценки вклада переносов в потепление (за 1969-2008 гг.)

Оценки для меридионального переноса (рис. 6) получены в соответствии с формулами

$$T_M = \beta_{DT} D_M \quad T_M = \beta_{DT} (\alpha_M t + D'_M) \quad \alpha_{MT} = \beta_{DT} \alpha_M \quad \alpha_T = \alpha_{MT} + \alpha_{RT}$$

где β – к-т регрессии, α_M – к-т тренда D_M , α_{MT} – тренд, связанный с D_M , α_{RT} – с другими причинами.

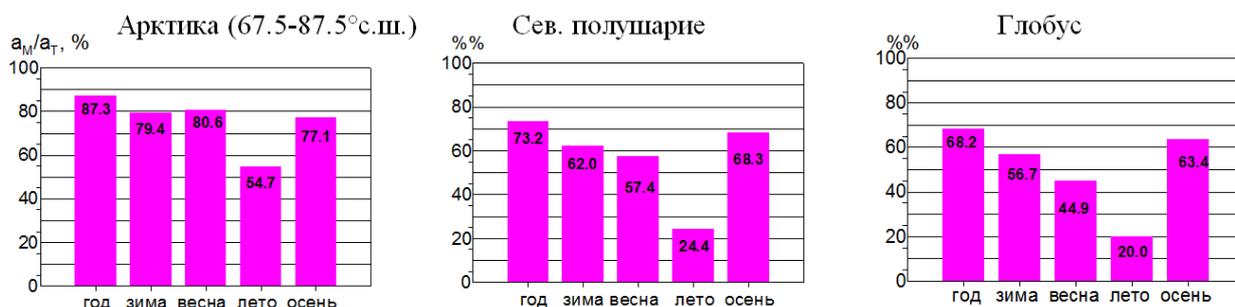


Рисунок 6. Оценки вклада усиления меридионального переноса в потепление в 1969-2008 гг.

Аналогичные оценки выполнены для зональных переносов по данным реанализа, сеточных архивов и смоделированных значений (рис. 7).

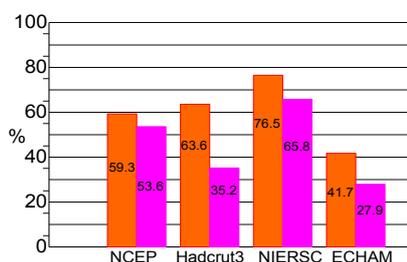


Рисунок 7. Оценки вклада усиления зонального переноса в потепление умеренных широт Северного полушария в 1969-2008 гг. Столбик слева - зимой, справа – в холодную половину года (октябрь-март).

Арктическое усиление

Исходя из определяющей роли притоков тепла в Арктику показано (Алексеев и др., 1991; Алексеев 2004), что изменчивость приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) зимой в период полярной ночи зависит от изменчивости притоков энергии с циркуляцией атмосферы и океана:

$$\sigma_T = \frac{T_0}{4} \frac{\sigma_Q}{Q_0},$$

где T_0 и Q_0 – климатические значения температуры и притока энергии в полярную область, σ - среднеквадратичные отклонения соответствующих величин от климатических норм. Поскольку в многолетнюю изменчивость ПТВ основной вклад вносят долгопериодные изменения, включая тренд, то он также зависит от изменений циркуляции атмосферы в первую очередь. В этом случае усиление изменений ПТВ в высоких широтах по сравнению с прилегающими широтами определяются в первом приближении соотношением их площадей.

Заключение об определяющей роли адвекции тепла в усилении потепления в Арктике были подтверждены в работах (Alexeev et al., 2005; Cai, 2005; 2006) с использованием энергобалансовых моделей и модели общей циркуляции атмосферы. Хотя многие исследователи разделяют толчку зрения о решающей роли адвективного переноса тепла и влаги в высокие широты в развитие арктического потепления, исследования в этом направлении продолжаются. Более того, утверждается, что основные причины усиления остаются неизвестными.

Основная причина остающихся расхождений в оценке причин усиления связана с тем, что усиление циркуляции и переносов ведет к появлению положительных обратных связей, которые принимаются за главные причины усиления. К этим обратным связям

относится, прежде всего, сокращение площади и сплоченности морского льда и увеличение пространств открытой воды в конце летнего периода. Другая важная обратная связь появляется с увеличением поступления влаги при усилении адвективного переноса и притока длинноволновой радиации (ДВР) к поверхности.

МОРСКОЙ ЛЕД В ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ КЛИМАТА

Глобальные модели климата предоставляют эффективный инструмент для проверки знаний о процессах в климатической системе Земли, исследования ее реакции на внешние воздействия и чувствительности к изменениям параметров системы. Прогностические приложения расчетов на глобальных моделях ограничены необходимостью заранее знать внешние воздействия на систему и/или изменения внутренних ее параметров. Заранее известны лишь регулярные внешние воздействия, связанные с изменениями приходящей к Земле солнечной радиации и предполагаемые сценарии поступления малых газовых примесей и аэрозолей в результате деятельности человека.

Анализ результатов расчетов изменений площади морского льда (ПМЛ) в Арктике в первой половине 21-го столетия, которые содержатся в СМIP3, показал, что модели завышают протяженность морского льда и ошибки наиболее значительны в Баренцевом и Карском морях. Многолетние изменения ПМЛ по расчетам на моделях из СМIP5 лучше согласуются с наблюдениями по сравнению с расчетами на моделях из СМIP3. Однако по-прежнему наблюдаемое сокращение площади льда опережает модельные расчеты, а летняя температура воздуха в морской Арктике повышается значительно больше, чем в моделях.

ВЫВОДЫ

Причинами арктического усиления потепления климата и деградации ледяного покрова является увеличение поступления тепла и влаги циркулирующей атмосферой, сопровождающиеся увеличением притока ДВ радиации, накоплением тепла освобождающейся ото льда акваторией СЛЮ, выносом большего количества льда и переходом к преобладанию однолетних льдов.

Предложенные индексы для оценки влияния колебаний переносов энергии в атмосфере на межгодовую изменчивость средней температуры воздуха показали, что с **усилением меридиональных и зональных переносов** связана значительная часть современного глобального потепления, независимо от его антропогенного или естественного происхождения.

Недавние данные наблюдений указывают на замедление потепления в Арктике, что свидетельствует об актуальности мониторинга климата Арктики, тем более что глобальные модели климата все еще отстают в описании реальных изменений.

При подготовке тезисов использованы результаты исследований, выполненных при поддержке Минобрнауки (проект 2011-16-420-1-002), РФФИ (09-05-00232-а) и в рамках ЦНТП Росгидромета (1.3.2.1). Автор благодарит Н.Е. Иванова и Н.Е. Харланенкову за проведение расчетов по массивам данных о ПТВ, С.И. Кузмину – за подготовку данных расчетов по модели ЕСНАМ и выборку из ансамбля расчетов СМIP5.

Список литературы

Алексеев Г.В. Взаимодействие океана и атмосферы как термодинамический процесс.

Труды ААНИИ, 1982, т. 383, с. 25-34.

Алексеев Г.В. Исследования изменений климата Арктики в XX столетии. Тр. ААНИИ, 2003, т. 446, 6-21.

- Алексеев Г.В. Роль циркуляции атмосферы и других факторов в формировании климата Арктики. В кн.: Формирование и динамика современного климата Арктики. Под ред. проф. Г.В. Алексеева. СПб., Гидрометеиздат, 2004. С. 27–46.
- Алексеев Г.В., Н.Е. Иванов, А.В. Пнюшков, Н.Е. Харланенкова. Климатические изменения в морской Арктике в начале XXI века. Том “Метеорологические и геофизические исследования”. Изд-во “Европейские издания”. Москва, 2011. стр. 3-25.
- Алексеев Г.В., Нагурный А.П. Роль морского льда в формировании годового цикла двуокси углерода в Арктике. // Доклады РАН. 2007. Т. 417, №4, с. 541-544.
- Алексеев Г.В., Подгорный И.А., Священников П.Н. Адвективно-радиационные колебания климата. ДАН СССР, 1990, т. 315, №4, с. 824-827.
- Алексеев Г.В., Подгорный И.А., Священников П.Н. Колебания отепляющего влияния океанов на глобальный климат. ДАН СССР, 1991, т. 320, №1, с. 70-73.
- Алексеев Г.В., Священников П.Н. Естественная изменчивость характеристик климата Северной полярной области и северного полушария. Л., ГМИ, 1991, 159 с.
- Блинова Е.Н. (1943) Гидродинамическая теория волн давления и центров действия атмосферы. ДАН СССР, 39, 7:284-287.
- Будыко М.И. Изменение климата. —Л.: Гидрометеиздат, 1974.— 280 с.
- Ван Мигем Ж. Энергетика атмосферы. Пер. с англ. Под ред. Л.Т. Матвеева. Л., Гидрометеиздат, 1977, 327 с.
- Вангенгейм Г.Я. О колебаниях атмосферной циркуляции над северным полушарием.— Изв. АН СССР. География и геофизика, 1946, т. 10, вып. 5, с. 405-416.
- Васюта Ю.В., Мохов И.И. Петухов В.К. Чувствительность малопараметрических моделей климата к изменению характеристик меридионального переноса тепла. Изв. АН СССР, ФАО, 1988, т. 24, №2, с. 115-125.
- Визе В.Ю. Причины потепления Арктики // Сов. Арктика. 1937. №1.
- Виттельс Л.А. Циклоны северных морей и потепление Арктики // Метеорология и гидрология. 1946. №5. С. 32-40.
- Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. —Л.: Гидрометеиздат, 1971—280 с.
- Груза Г.В. Интегральные характеристики общей циркуляции атмосферы. Л., 1965. 146 с.
- Демченко П.Ф. Аналитическая модель широтного хода дисперсии и спектров флуктуаций зонально-осредненной температуры. Изв АН СССР, ФАО, 1984, т. 20, с. 144-150.
- Демченко П.Ф., Зубарев А.П. Оценки низкочастотной изменчивости среднезональных температур, вызванной флуктуациями меридионального переноса тепла. Изв. АН СССР, ФАО, 1989, т. 25, с. 917-924.
- Дзердзеевский Б.Л. К вопросу о потеплении Арктики // Изв. АН СССР., сер. геофизическая и географическая. 1943. №2. С. 60-69.
- Дзердзеевский Б.Л., Монин А.С., 1954. Типовые схемы общей циркуляции атмосферы и индекс циркуляции. Изв. АН СССР, сер. Геофиз., №6, 1954.
- Захаров В.Ф. Внутривековые изменения в распространении морских арктических льдов в XX столетии. В кн.: Формирование и динамика современного климата Арктики / Под. ред. Алексеева Г.В. СПб., Гидрометеиздат, 2004. С. 112–159.
- Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В. Радиационный баланс Земли, ключевые аспекты. – М.: Наука, 1988. – 216 с.
- Марчук Г.И., Скиба Ю.Н. Численный расчет сопряженной задачи для моделей термического взаимодействия атмосферы с океаном и континентом. Изв. АН СССР, ФАО, 1976, т. 12, №5, с. 16-24.
- Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайрулин Р.Р. Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 1992, т. 28, №1, 11-26.

- Мохов И.И., Петухов В.К. Параметризация уходящей длинноволновой радиации для климатических моделей. Препринт ИФА АН СССР, М., 1978, 34 с.
- Недашковский А.П., Макштас А.П. Эмиссия CO₂ в атмосферу при образовании арктического морского льда. Проблемы Арктики и Антарктики, 2010, № 3(86), с.
- Николаев Ю.В. Крупномасштабное взаимодействие океана и атмосферы и формирование аномалий погоды. —Л.: Гидрометеиздат, 1981.—51 с.
- Семенов В.Г. Влияние Атлантического океана на режим температуры и осадков на Европейской территории СССР. Л., 1960, Гидрометеиздат, 146 с.
- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб., «НАУКА», 2007, 135 с.
- Хрол В.П., 1992: Атлас энергетического баланса северной полярной области. – Л.: Гидрометеиздат, – 52 с.
- Agee E.M. Trends in cyclone and anticyclone frequency and comparison with periods of warming and cooling over the Northern Hemisphere. *J. Climate*, 1991, V. 4, No. 2:263-267.
- Alekseev G.V., Podgorny I.A. Modelling the effect of ocean's heating on global climate fluctuations. In: C.J. Boer, Research activities in atmospheric and oceanic modeling. GAS/JSC Working Group in Numerical Experimentation. 1992, Report 17, WMO/TD 467, pp. 7.62–7.63.
- Alekseev G.V., Podgorny I.A. Simulation of advective global climate fluctuations. In: C.J. Boer, Research activities in atmospheric and oceanic modeling. GAS/JSC Working Group in Numerical Experimentation. 1990, Report 14, WMO/TD 332, pp. 7.24–7.25.
- Alexeev V.A., P.L. Langen, J.R. Bates. Polar amplification of surface warming on an aquaplanet in “ghost forcing” experiments without sea ice feedbacks. *Climate Dynamics* (2005) DOI 10.1007/s00382-005-0018-3.
- Anderson L.G., Falck E., Jones E.P., Jutterström S., Swif J. Enhanced uptake of atmospheric CO₂ during freezing of seawater: A field study in Storfjorden, Svalbard // *J. Geophys. Res.* 2004. 109, C06004, doi:10.1029/2003JC002120.
- Bengtsson, L., V. A. Semenov, and O. M. Johannessen, 2004: The early-twentieth-century warming in the Arctic—A possible mechanism. *J. Climate*, 17, 4045–4057.
- Brinck Løyning, T., Dick, C., Goodwin, H., Pavlova, O., Vinje, T., Kjærnli, G., and Villinger, T. (2003) ACSYS historical ice chart archive (1553 – 2002), *International ACSYS/CliC Project Office*.
- Budyko M.I. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, 1969, v. 212, p. 611-619.
- Cai M. Dynamical greenhouse-plus feedback and polar warming amplification. Part I: A dry radiative-transportive climate model. *Climate Dynamics* (2006), 26: 661–675. DOI 10.1007/s00382-005-0104-6.
- Cai, M. (2005), Dynamical amplification of polar warming, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L22710, doi:10.1029/2005GL024481.
- Dickson R.R., T.J. Osborn, J.W. Hurrell, J. Meincke, J. Blindheim, B. Adlandsvik, T. Vinje, G. Alekseev, and T. Maslowsky (2000) The Arctic Ocean response to the North Atlantic oscillation. *J. Climate*, 13:2671-2696.
- Enfield, D.B., A.M. Mestas-Nunez, and P.J. Trimble, The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S., *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2077-2080, 2001.
- Environmental Working Group (EWG). Joint U.S. Russian Atlas of the Arctic Ocean: Oceanography Atlas for the Winter Period. Boulder, National Snow and Ice Data Center, CO, 1997.

- Environmental Working Group (EWG). Joint U.S. Russian Atlas of the Arctic Ocean: Oceanography Atlas for the Summer Period. Boulder, National Snow and Ice Data Center, CO, 1998.
- Flannery B.P. (1984) Energy-balance models incorporating transport of thermal and latent energy. *J. Atm. Sci.* 41:414–421.
- Hurrell J.W., Y. Kushnir, G. Ottersen, and M. Visbeck (Eds). *The North Atlantic Oscillation. Climate Significance and Environmental Impacts*, Geophysical Monograph Series, 134, 2003.
- Hurrell J.W., and H. van Loon (1997) Decadal variations in climate associated with the North Atlantic oscillation. *Climatic Change*, 36:301-326.
- Laxon, S., N. Peacock, and D. Smith. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region. *Nature*, 2013, V. 425, P. 947–950.
- Lenn Y.D., et al. Vertical mixing at intermediate depths in the Arctic boundary current // *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – 36. – L05601, doi:10.1029/2008GL036792.
- Liu Y., J.R. Key, X. Wang. The Influence of Changes in Cloud Cover on Recent Surface Temperature Trends in the Arctic. *Journal of Climate*, 2008, vol. 21, pp. 705-715.
- Mahoney, A.R., R.G. Barry, V. Smolyanitsky, and F. Fetterer (2008), Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933–2006, *J. Geophys. Res.*, 113, C11005, doi:10.1029/2008JC004830.
- Maslanik, J., S. Drobot, C. Fowler, W. Emery, and R. Barry (2007), On the Arctic climate paradox and the continuing role of atmospheric circulation in affecting sea ice conditions, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L03711, doi:10.1029/2006GL028269.
- Miller, L. A., G. Carnat, B. G. T. Else, N. Sutherland, and T. N. Papakyriakou (2011), Carbonate system evolution at the Arctic Ocean surface during autumn freeze-up, *J. Geophys. Res.*, 116, C00G04, doi:10.1029/2011JC007143.
- Nakamura, N., and A.H. Oort (1988), Atmospheric heat budgets of the polar regions, *J. Geophys. Res.*, 93(D8), 9510–9524.
- North G.R., Cahalan R.F., Coakley J.A. Energy balance climate models. —*Rev. Geophys. Space Phys.*, 1981, vol. 19, №1, p. 91-121.
- North G.R., Moeng F.J., Bell T.L., Cahalan R.F. Latitudinal dependence of the variability of sonal mean.—*MWR*, 1982, vol. 110, №5, p. 319—326.
- Ogi M., I.G. Rigor, M.G. McPhee, and J.M. Wallace (2008), Summer retreat of Arctic sea ice: Role of summer winds, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L24701, doi:10.1029/2008GL035672.
- Perovich, D.K., B. Light, H. Eicken, K.F. Jones, K. Runciman, and S.V. Nghiem (2007), Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979–2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L19505, doi:10.1029/2007GL031480.
- Petoukhov V., Semenov V.A. (2010) A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J Geoph Res* 2010 doi.10.1029/2009JD013568.
- Proshutinsky, A.Y. and M.A. Johnson (1997), Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 102(C6), 12, 493–12, 514, doi:10.1029/97JC00738.
- Rosby C.G. (1939) Relations between variations in the intensity of the zonal circulation and displacement of the semipermanent centers of action. *J. Marine Res.* 2:38-55.
- Rothrock, D.A., Yu Y., and Maykut G.A. Thinning of the Arctic sea ice cover. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, V. 26(23), P. 3469-3472.
- Schlesinger M.E., and N. Ramankutty, An oscillation in the global climate system of period 65-70 years, *Nature*, 1994, 367, p. 723-726.
- Sellers W.D. A climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. *J. Appl. Meteor.*, 1969, 8 p. 392-400.
- Semiletov, I., A. Makshtas, S.-I. Akasofu, and E.L. Andreas (2004), Atmospheric CO₂ balance: The role of Arctic sea ice, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L05121, doi:10.1029/2003GL017996.

- Serreze, M.C., A.P. Barrett, A.G. Slater, M. Steele, J. Zhang, and K.E. Trenberth (2007), The large-scale energy budget of the Arctic, *J. Geophys. Res.*, 112, D11122, doi:10.1029/2006JD008230.
- Shaw W. J., Stanton T.P., McPhee M.G., Morison J.H., Martinson D.G. Role of the upper ocean in the energy budget of Arctic sea ice during SHEBA // *J. Geophys. Res.* – 2009. – 114. – C06012, doi:10.1029/2008JC0049919.
- Stroeve, J. C., J. Maslanik, M. C. Serreze, I. Rigor, W. Meier, and C. Fowler (2011), Sea ice response to an extreme negative phase of the Arctic Oscillation during winter 2009/2010, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L02502, doi:10.1029/2010GL045662.
- Thompson D.W.J. and J.M. Wallace (1998) The Arctic Oscillations signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett* 25:1297-1300.
- Timmermans M.-L., Toole J., Krishfield R., Winsor P. Ice-Tethered Profiler observations of the doublediffusive staircase in the Canada Basin thermocline // *J. Geophys. Res.* – 2008. – 113.
- Van Loon H. and Williams J. (1976) The connection between trends of mean temperature and circulation at the surface: Part 1. Winter. *Mon. Wea. Rev.* 104:365-380.
- Vinje, T., 2001: Anomalies and trends of sea ice extent and atmospheric circulation in the Nordic Seas during the period 1864–1998. *J. Climate*, 14(3), 255–267.
- Wallace J.M., Yuan Zhang, Renwick J.A. (1995) Dynamic Contribution to Hemispheric Mean Temperature Trends. *Science* .Vol. 270:780-783.
- Wallace J.M., Y. Zhang and L Bajuk (1996) Interpretation of interdecadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature. *J. Climate*, 9: 249–260.
- Wang J., J. Zhang, E. Watanabe, M. Ikeda, K. Mizobata, J.E. Walsh, X. Bai, and B. Wu (2009), Is the Dipole Anomaly a major driver to record lows in Arctic summer sea ice extent?, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L05706, doi:10.1029/2008GL036706.
- Weston, S. T., W. G. Bailey, L. J. B. McArthur, and O. Hertzman (2007), Interannual solar and net radiation trends in the Canadian Arctic, *J. Geophys. Res.*, 112, D10105, doi:10.1029/2006JD008000.
- Wu Bingyi, Jia Wang, John E. Walsh. Dipole Anomaly in the Winter Arctic Atmosphere and Its Association with Sea Ice Motion. *Journal of climate*, 2006, V. 19, p. 210-225.
- Zhang X.A. Sorteberg, J. Zhang, R. Gerdes, and J.C. Comiso (2008) Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system. *Geophys. Res. Lett.* 35 L22701 doi. 10.1029/2008GL035607.