

УДК [551.465.7:551.510]:001.891.573

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОКЕАНА И ЯВЛЕНИЙ ЭЛЬ-НИНЬО И ЛА-НИНЬЯ НА СТРУКТУРУ И СОСТАВ АТМОСФЕРЫ

А.Р. Яковлев, С.П. Смышляев

Российский государственный гидрометеорологический университет, smyshl@rshu.ru

Представлено краткое описание явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Также приводится описание химико-климатической модели ССМ. Эта модель позволяет осуществлять прогноз изменений различных параметров атмосферы для всего мира. Приведено сравнение результатов численных экспериментов с данными ре-анализа, а также анализ воздействия океана и явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья на атмосферу.

Ключевые слова: Эль-Ниньо, Ла-Нинья, численная модель, температура воздуха, температура поверхности океана, площадь ледяного покрова.

THE NUMERICAL SIMULATIONS OF GLOBAL INFLUENCE OF OCEAN AND EL-NINO — LA-NINA ON STRUCTURE AND COMPOSITION OF ATMOSPHERE

A.R. Jakovlev, S.P. Smyshlyaev

Russian State Hydrometeorological University

The El-Nino — La-Nina phenomenon and chemistry-climate model (CCM) are described. This model was developed at the INM RAS and RSHU to solve prognostic problems of parameters for global atmosphere. The comparison of results of numerical experiments with re-analysis and analysis of influence of ocean and El-Nino — La-Nina phenomenon are described.

Keywords: El-Nino, La-Nina, numerical modeling, temperature of air, sea surface temperature, sea ice cover.

Введение

Погодные и климатические процессы, происходящие на Земле, тесно связаны с взаимодействием атмосферы и океана. Это взаимодействие порождает большое разнообразие различных явлений и процессов в атмосфере и океане. Наиболее известный источник этих процессов в океане и атмосфере — явление Эль-Ниньо, представляющее собой течение в восточной части тропического региона Тихого океана. Эль-Ниньо является региональным явлением и приводит к повышению температуры поверхностного слоя океана, но влияние этого явления проявляется в глобальном масштабе [3].

Атмосферным компонентом Эль-Ниньо является Южная осцилляция [2, 3], при которой происходят колебания атмосферного давления между восточной и западной частью Тихого океана. Из-за низкого давления в восточной части Тихого океана начинается глубокая конвекция. В результате повышения температуры воды влажность в западной части Южной и Центральной Америки возрастает, что приводит к проливным дождям, грозам, наводнениям и ураганам. Происходит ослабление пассатов, вследствие чего в Австралии начинается засуха.

Ла-Нинья представляет собой холодную фазу этого явления, при которой происходит понижение температуры в верхнем слое океана [3]. При этом атмосферное давление повышается, и конвективные процессы прекращаются. Взаимодействие океана и атмосферы, в том числе и явление Эль-Ниньо — Ла-Нинья, является актуальным предметом научных исследований, благодаря которым были разработаны различные модели для анализа и прогноза этого явления. На основании многочисленных исследований была обнаружена квазидвухлетняя цикличность явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья [1, 2, 3, 8].

В настоящее время таких моделей существует огромное множество. Эти модели позволяют анализировать поля аномалий температуры поверхности океана и процессы, происходящие в атмосфере, что, в свою очередь, позволяет установить взаимосвязи между ними [1, 8]. В этих моделях изучается влияние явления Эль-Ниньо на погоду и климат в тропической зоне — Южной Америке и Австралии, а также на поля температуры воздуха, влажности и ветра [1, 8, 14]. При этом в последнее время возникла необходимость в изучении влияния океана [14] и Эль-Ниньо на глобальные процессы, происходящие на Земле, на процессы в полярных и высотных зонах, а также на химический состав атмосферы.

Целью данного исследования является изучение влияния океана, явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья на различные метеопараметры атмосферы, особенно на температуру воздуха. Океан вызывает различные процессы в атмосфере, что приводит к перемешиванию и переносу массы. Следовательно, океан может оказывать влияние на изменение метеопараметров и химические процессы в атмосфере. Для исследования влияния океана на состояние атмосферы использовалась химико-климатическая модель, которая описана в следующем разделе.

Описание модели

В настоящем исследовании использовалась химико-климатическая модель (ХКМ), которая была разработана в Институте вычислительной математики РАН [4] и Российском государственном гидрометеорологическом университете [7]. Эта модель состоит из динамической и химической частей, которые рассчитывают метеорологические величины и параметры атмосферных газов соответственно.

Разрешение модели является достаточно грубым (4° по широте и 5° по долготе), так как описывает глобальные процессы. Охват по долготе — от 185° з.д. до 180° в.д., по широте — от 88° ю.ш. до 88° с.ш. По вертикали модель имеет 39 σ -уровней (от 0 до 88 км, или от поверхности до уровня 0,003 гПа); при этом результаты моделирования интерполируются в изобарическую систему координат на 31 стандартную изобарическую поверхность. Число узлов в модели 72 по долготе и 45 по широте. Шаг по времени в модели в начале исследования составляет 12 мин, а затем уменьшается до 6 мин. Модель обновляет внешние данные, в том числе температуру поверхности океана и площадь его покрытия льдом, через каждые 6 ч (четыре раза в сутки).

Динамическая часть модели включает в себя основные уравнения гидродинамики и термодинамики атмосферы. По ним рассчитываются значения температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, плотности воздуха, скорости ветра. Также в эту часть включены модули, по которым учитываются неадиабатические

процессы — турбулентность, конвекция, солнечная радиация, влияние подстилающей поверхности и океана на атмосферу. Влияние океана учитывается в модели путем задания условий на нижней границе в той части модельной сетки, которая покрывает поверхность океана. Химическая схема модели позволяет рассчитывать распределение 74 газовых примесей, среди которых озон O_3 , соединения азота NO_x , парниковые и другие газы, участвующие в различных химических реакциях, и в частности в реакции фотодиссоциации. При этом 30 из этих газов являются долгоживущими.

Методология

Основным методом данного исследования является численное моделирование атмосферных процессов. Изменения основных метеовеличин (температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, плотности воздуха и скорости ветра) описываются уравнениями термодинамики, сохранения водяного пара, состояния воздуха, неразрывности и движения атмосферы. Эти уравнения решаются только численными методами. В ХКМ используются конечно-разностные методы, которые аппроксимируют уравнения в сетку С Аракавы [4].

Неадиабатические процессы, связанные с солнечной радиацией, турбулентностью, конвекцией и влиянием подстилающей поверхности на атмосферу, учитываются посредством параметризации. Эволюция газовых примесей определяется с помощью уравнений их переноса, которые также решаются конечно-разностными методами; при этом для решения данной задачи определяются скорости химических реакций.

Между динамической и химической частями модели происходит обмен расчетными данными, что позволяет учитывать влияние всех этих процессов друг на друга [4, 7]. Для изучения взаимодействия атмосферы и океана проводились различные эксперименты, одним из которых был AMIP II [15]. Этот эксперимент позволил воспроизвести эволюцию газовых примесей и метеопараметров атмосферы в зависимости от параметров океана.

Начальные данные для метеопараметров были взяты из CIRA-86 и NCEP [6, 11]. Данные для распределения озона взяты из спутниковых данных TOMS [12]. Для изучения влияния океана на атмосферу было проведено четыре эксперимента, в каждом из которых использовались разные данные о температуре поверхности океана и площади ледяного покрова. Для первого, второго и третьего экспериментов использовались данные Met Office [16], при этом в первом учитывалось влияние только площади ледяного покрова, во втором — только температуры поверхности океана, а в третьем — и того, и другого. Для четвертого использовались данные ERA Interim [15].

Для того чтобы результаты моделирования можно было сравнить с наблюдаемыми в период моделирования процессами в атмосфере, использовались данные реанализа — это данные о температуре, скорости ветра и концентрации озона MERRA [13], ERA Interim [5], JRA [10] и UKMO [11], с которыми сравниваются результаты моделирования. При этом в MERRA, ERA Interim, JRA и UKMO есть 25, 21, 21 и 22 вертикальных уровня соответственно. Данные реанализа были приведены к модельной сетке (72 узла по долготе, 45 узлов по широте, 31 уровень

по вертикали) для сравнения с результатами моделирования. Моделирование осуществлялось для периода с 1979 по 2015 г. Для данных реанализа MERRA выбран период с 1980 по 2016 г., для ERA Interim и JRA — с 1979 по 2015 г., для UKMO — с 1992 по 2016 г.

Результаты модельных экспериментов

Модель использовалась в прогностическом режиме; при этом результаты прогноза корректировались с помощью специального блока, который исправляет небольшие ошибки, возникающие при моделировании.

Для моделирования использовались данные наблюдений для различных параметров атмосферы, а также данные реанализа. В модели данные обновлялись каждые 6 ч с целью избежать нелинейной вычислительной неустойчивости. Моделирование проводилось за период с 1 января 1979 г. по 31 декабря 2015 г. Как сказано ранее, в 1-м, 2-м и 3-м экспериментах использовались данные о температуре поверхности океана и площади ледяного покрова Met Office, в 4-м эксперименте — данные ERA Interim.

При этом в 1-м эксперименте учитывалась многолетняя изменчивость только площади ледяного покрова, тогда как температура поверхности океана была фиксированной. Во 2-м эксперименте фиксированной была площадь ледяного покрова, изменялась температура поверхности океана. Для этих двух экспериментов шаг по времени в модели был равен 12 мин.

В 3-м и 4-м экспериментах учитывалась изменчивость как температуры поверхности океана, так и площади ледяного покрова, что сильнее приближало численные прогнозы в моделях к реальным данным. Однако в этих экспериментах произошли ошибки, из-за которых было получено отрицательное давление, вследствие чего модель прекращала работу. Для решения этой проблемы шаг по времени для этих экспериментов был уменьшен до 6 мин, что сделало прогноз более точным.

В результате этих экспериментов были получены глобальные распределения и эволюция таких важных параметров, как температура воздуха, скорость ветра и отношение смеси для озона. Далее представлена визуализация этих результатов — средние зональные профили этих параметров. Чтобы сравнить результаты моделирования с данными наблюдений, также представлена визуализация данных реанализа.

На рис. 1 представлены результаты моделирования за январь и июль 1998 г. Из рисунков видно, что воздух сильно нагревается в приземном и пограничном слоях (до высоты 10 км) и в верхних слоях атмосферы (выше 30—40 км). В слое от 10 до 30—40 км температура наиболее низкая. Над тропической зоной на высоте от 10 до 25 км наблюдается очаг холода (температура воздуха ниже 200 К). При этом в зимние месяцы над арктическими широтами на высоте от 10 до 30 км наблюдается слабый очаг холода (температура около 210 К), тогда как над Южным полушарием на высоте 50—60 км — очаг тепла (температура выше 300 К). В летние месяцы картина обратная: за Южным полярным кругом в слое от 10 до 30 км наблюдается мощный очаг холода (температура ниже 190 К), а в слое от 50 до 60 км — очаг тепла (температура выше 300 К). За Северным полярным

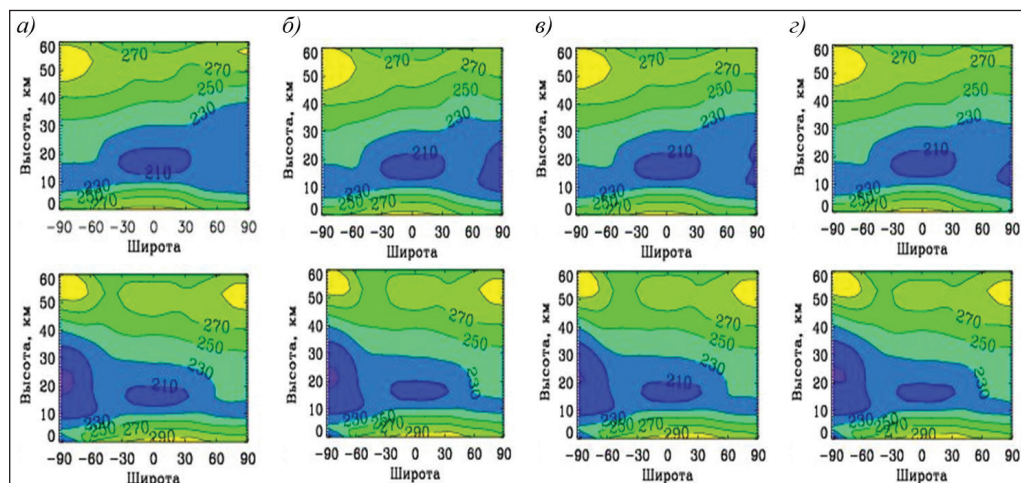


Рис. 1. Средние зональные профили температуры воздуха (K) по результатам четырех экспериментов: первого (а), второго (б) третьего (в) и четвертого (з). Верхний ряд — январь, нижний ряд — июль 1998 г.

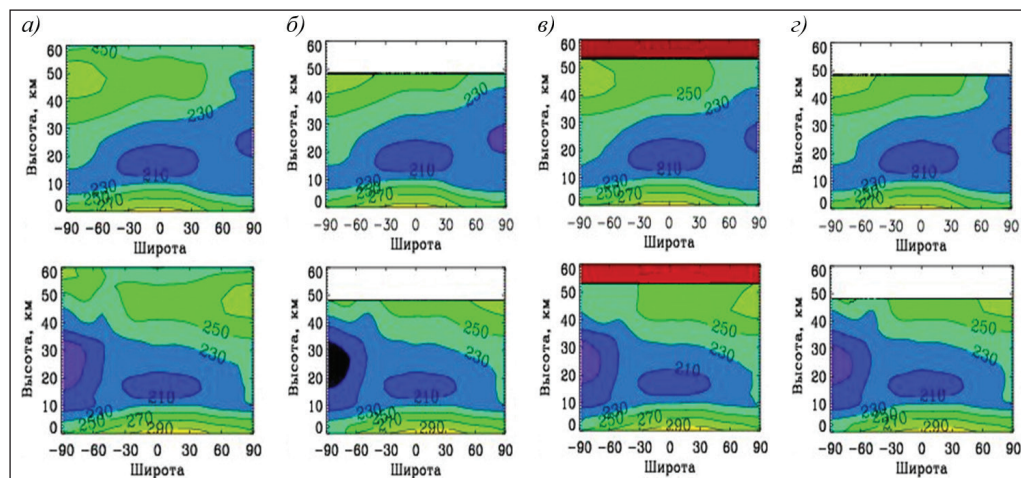


Рис. 2. Средние зональные профили температуры воздуха (K) по данным реанализа MERRA (а), JRA (б), UKMO (в) и ERA Interim (з). Верхний ряд — январь, нижний ряд — июль 1998 г.

кругом в этом же слое также есть очаг тепла (температура выше 290 K). Такое распределение температуры воздуха вполне согласуется с реальностью.

На рис. 2 представлены результаты визуализации данных реанализа по температуре воздуха также для января и июля 1998 г. Из рисунка видно, что профили температуры по данным реанализа согласуются с результатами моделирования. Однако есть и отличия. По данным MERRA, над тропической зоной на высоте

40—50 км наблюдается небольшой очаг тепла, который в результатах моделирования сливается с более крупными. Также в июле над Южным полюсом в очаге холода температура воздуха понижается до отметок около 180 К, хотя в модели температура не понижается менее чем до 190 К. Это говорит о сглаживающем эффекте при моделировании. Также видно, что 3-й и 4-й эксперименты, которые учитывали изменчивость температуры океана и площади льда и которые проводились с меньшим шагом по времени, дают более близкие к данным реанализа результаты. Поэтому для дальнейшего анализа будут рассматриваться результаты 3-го и 4-го экспериментов.

На рис. 3 изображены средние зональные профили отношения смеси озона для января и июля 1998 г. Из рисунка видно, что существенные значения отношения смеси озона наблюдаются в стратосфере (от 20 до 45 км), что соответствует озоновому слою. При этом максимальное значение (более 15 кг/кг) наблюдается над тропической зоной на высоте 30—35 км. Результаты экспериментов, в целом, соответствуют данным реанализа, хотя, как и в случае с температурой воздуха, наблюдается сглаживание: в районе полюсов распределение более плавное и монотонное, чем по данным реанализа.

На рис. 4 и 5 представлены средние зональные профили зональной и меридиональной составляющей скорости ветра соответственно. Из рисунков по профилям зональной составляющей видно, что в зимние месяцы наблюдаются струйные течения, направленные с запада на восток в широтных зонах от -60 до -30° и от 30 до 60° и в слое от 5 до 15 км, а также струйные течения на высоте более 30 км. При этом в Северном полушарии ветер направлен с запада на восток, а в Южном — наоборот. В летние месяцы наблюдается струйное течение над широтным поясом 30 — 60° , при этом в слое 5—15 км оно направлено с запада на восток,

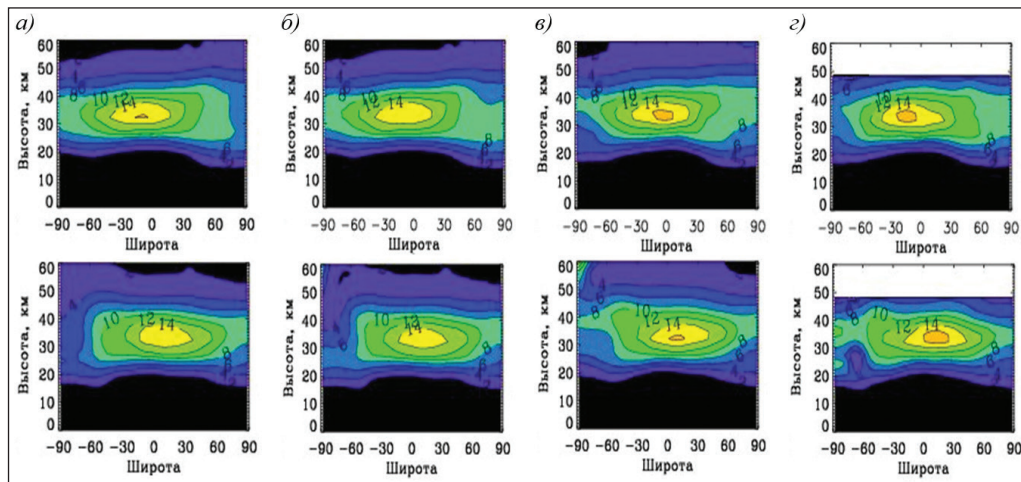


Рис. 3. Средние зональные профили отношения смеси для озона по результатам третьего (а) и четвертого (б) экспериментов, а также по данным реанализа MERRA (е) и ERA Interim (з). Верхний ряд — январь, нижний ряд — июль 1998 г.

а на высотах более 40 км — наоборот. В Южном полушарии наблюдается мощное струйное течение с запада на восток практически во всей атмосфере. При этом именно в Южном полушарии скорость ветра достигает наибольших значений — более 70 м/с на высоте 40 км в июле и более 60 км в январе. По данным реанализа

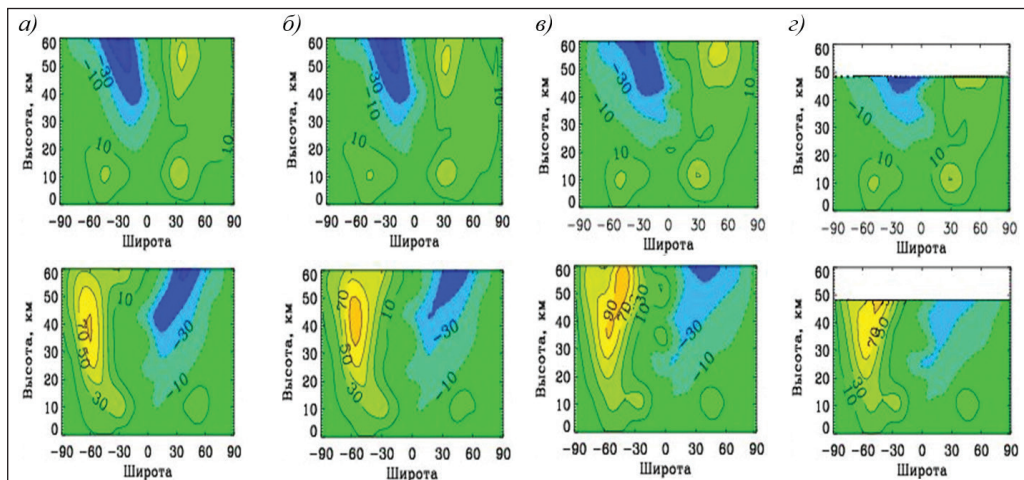


Рис. 4. Средние зональные профили зональной составляющей скорости ветра по результатам третьего (а) и четвертого (б) экспериментов, а также по данным реанализа MERRA (в) и ERA Interim (з). Верхний ряд — январь, нижний ряд — июль 1998 г.

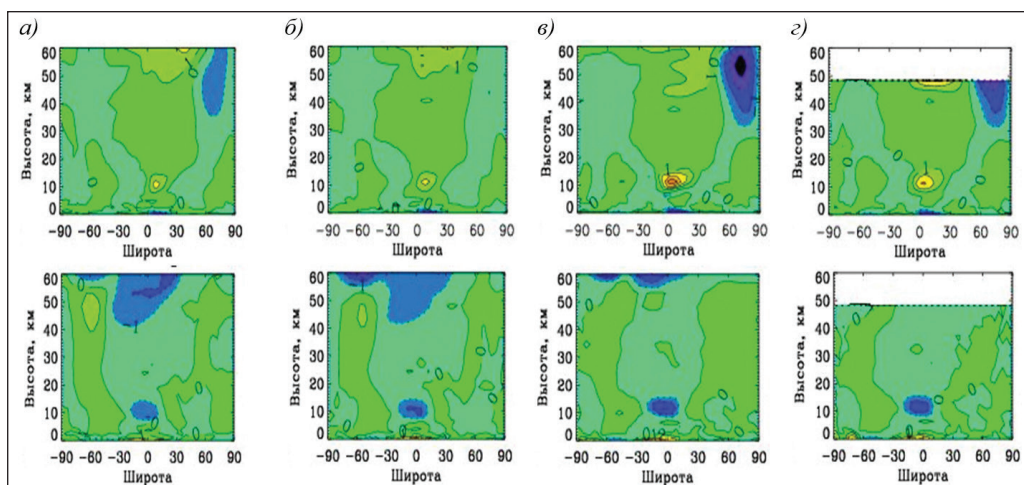


Рис. 5. Средние зональные профили меридиональной составляющей скорости ветра по результатам третьего (а) и четвертого (б) экспериментов, а также по данным реанализа MERRA (в) и ERA Interim (з). Верхний ряд — январь, нижний ряд — июль 1998 г.

также наблюдается струйное течение над экватором в слое 30—40 км, которое сглаживается при моделировании.

По профилям меридиональной составляющей наибольшие значения скорости ветра наблюдаются над тропическими широтами в слоях 10—20 км и более 40 км, при этом в течение года она меняет направление, что видно по знаку скорости ветра на рисунках. По данным реанализа, в январе наблюдаются большие значения меридиональной скорости ветра (около 10 м/с) над северными полярными широтами в слое 40—60 км, которые несколько сглаживают результаты моделирования.

В целом, результаты 3-го и 4-го экспериментов довольно правдоподобны и схожи с данными реанализа. Поэтому по результатам этих экспериментов можно оценивать взаимодействие атмосферы и океана.

Также в результате экспериментов были построены графики многолетнего хода температуры воздуха. Еще были построены графики многолетнего хода аномалий температуры поверхности океана и площади ледяного покрова, чтобы можно было сравнить их с графиками температуры воздуха и оценить воздействие океана на атмосферу при таких явлениях, как Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Фазы Эль-Ниньо наблюдались в 1986—1987, 2002—2003, 2004—2005, 2009—2010 и 2014—2016 гг., но наиболее мощной была фаза 1997—1998 гг. [9].

На рис. 6 и 7 представлены средние зональные графики многолетнего хода температуры воздуха по результатам 3-го и 4-го экспериментов соответственно, а также многолетний ход аномалий температуры поверхности океана (ТПО) и площади покрытия льдом (ППЛ) по данным Met Office (рис. 6) и ERA Interim (рис. 7). На рис. *а* и *б* изображены графики для широты -88° (Южный полюс) и для высот 1,1 и 43 км (850 и 2 гПа), при этом для аномалий ТПО и ППЛ была выделена зона от -88 до -60° широты. На рис. *в* и *г* изображены графики для широты 0° (экватор) и тех же высот, но при этом для аномалий ТПО и ППЛ выделена экваториальная зона (от -20 до 20° широты). На рис. *д* и *е* изображены графики для широты 88° (Северный полюс) и для тех же высот, но при этом для аномалий ТПО и ППЛ выделена зона от 60 до 88° широты. На рис. 8 и рис. 9 изображены те же средние зональные графики многолетнего хода температуры воздуха по данным MERRA и ERA Interim соответственно; при этом многолетний ход аномалий температуры поверхности океана (ТПО) и площади покрытия льдом (ППЛ) построен по данным Met Office (см. рис. 8) и ERA Interim (см. рис. 9).

Из рисунков видно, что чем больше высота над уровнем моря, тем меньшее воздействие оказывает океан на атмосферу. Если на уровне 850 гПа (нижняя тропосфера) температура воздуха, в целом, коррелирует с ТПО, то на уровне 2 гПа (верхняя стратосфера) корреляция практически отсутствует: как правило, коэффициенты корреляции между температурой воздуха и ТПО не превышают 0,2—0,35. Однако в тропосфере в тропической зоне наблюдается значимая связь между температурой воздуха и ТПО — там коэффициенты корреляции достигают 0,6—0,8. Также видна многолетняя тенденция температуры воздуха: в тропосфере в Северном полушарии и на Северном полюсе наблюдается повышение температуры с годами. На Южном полюсе и в Южном полушарии такой тенденции не наблюдается (3-й эксперимент и данные ERA Interim) или есть тенденция к понижению температуры (4-й эксперимент и данные MERRA). В тропической зоне

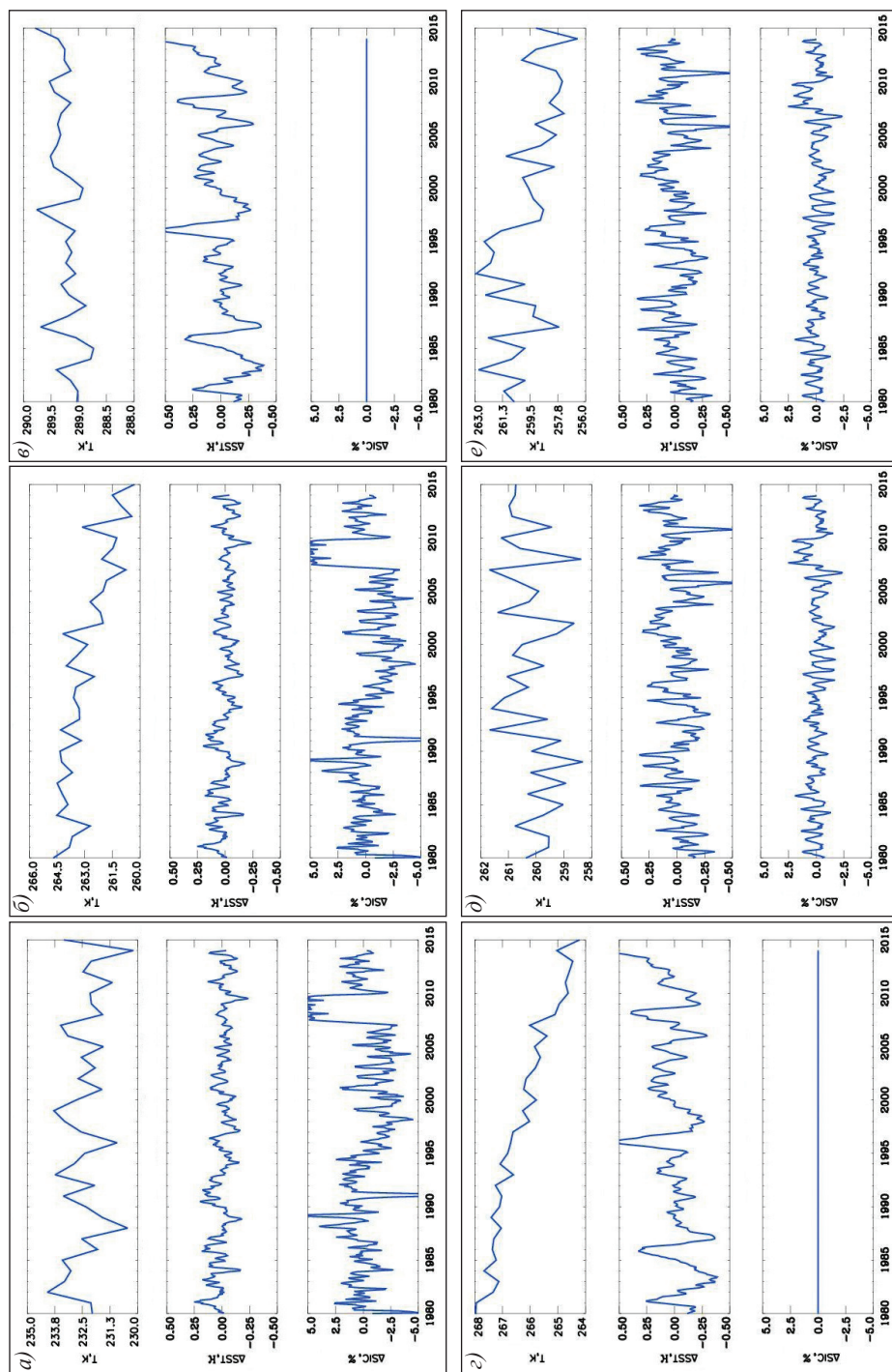


Рис. 6. Изменение температуры воздуха по результатам 3-го эксперимента (вверху), а также аномалий ТПО (посередине) и ППЛ (внизу) для широты 88° и высоты 1,1 км (a) и 43 км (б), для широты 0° и высоты 1,1 км (в) и 43 км (г) и широты 88° и высоты 1,1 км (д) и 43 км (е).

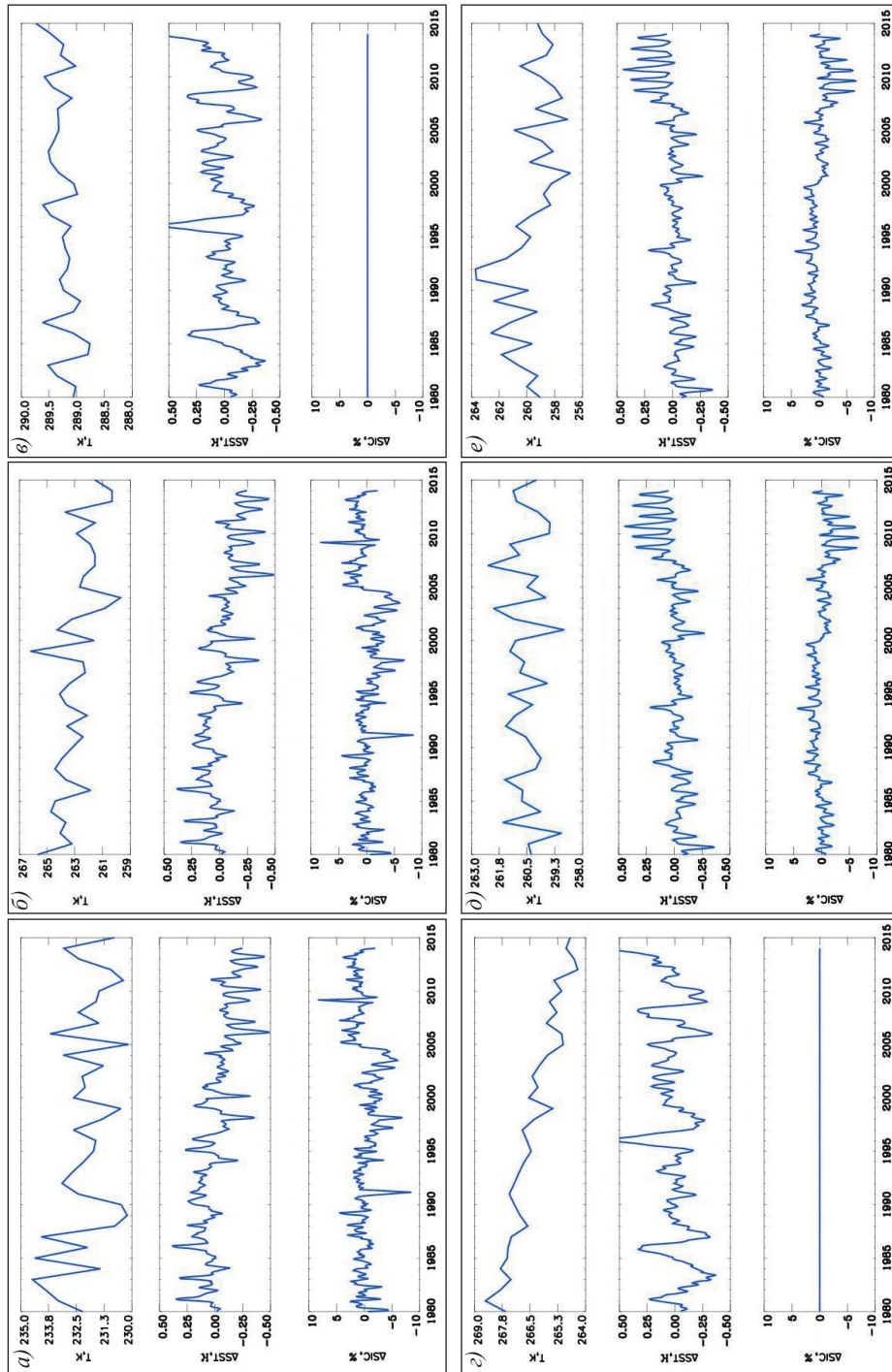


Рис. 7. Изменение температуры воздуха по результатам 4-го эксперимента (вверху), а также аномалий ТПО (посередине) и ИПЛ (внизу) для широты -88° и высоты 1,1 км (a) и 43 км (б), для широты 0° и высоты 1,1 км (в) и 43 км (г) и широты 88° и высоты 1,1 км (д) и 43 км (е).

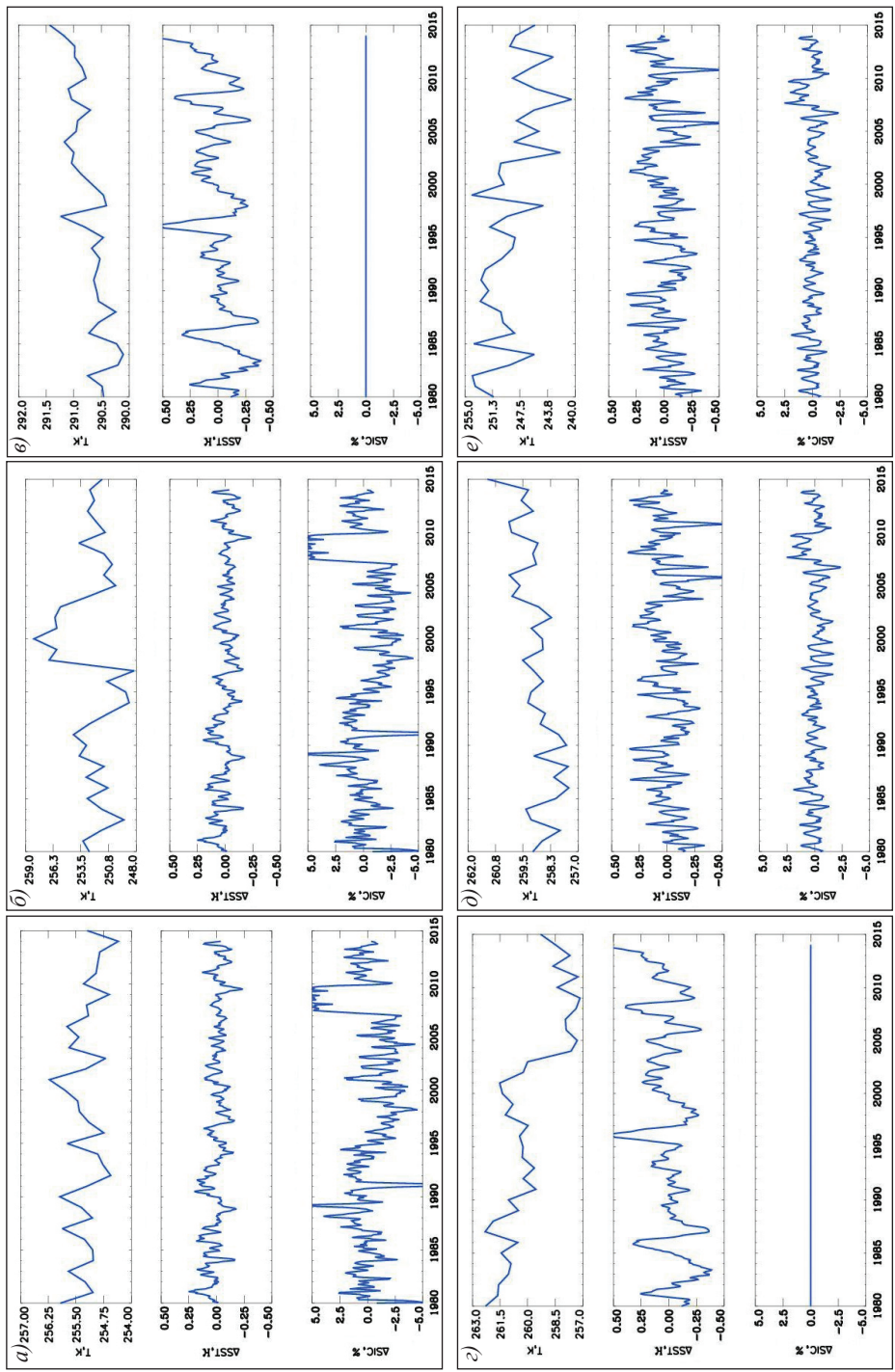


Рис. 8. Изменение температуры воздуха по данным MERRA (вверху), а также аномалий ТПО (посередине) и ППИ (внизу) для широты 88° и высоты 1,1 км (a) и 43 км (б), для широты 0° и высоты 1,1 км (в) и 43 км (г), и широты 88° и высоты 1,1 км (д) и 43 км (е).

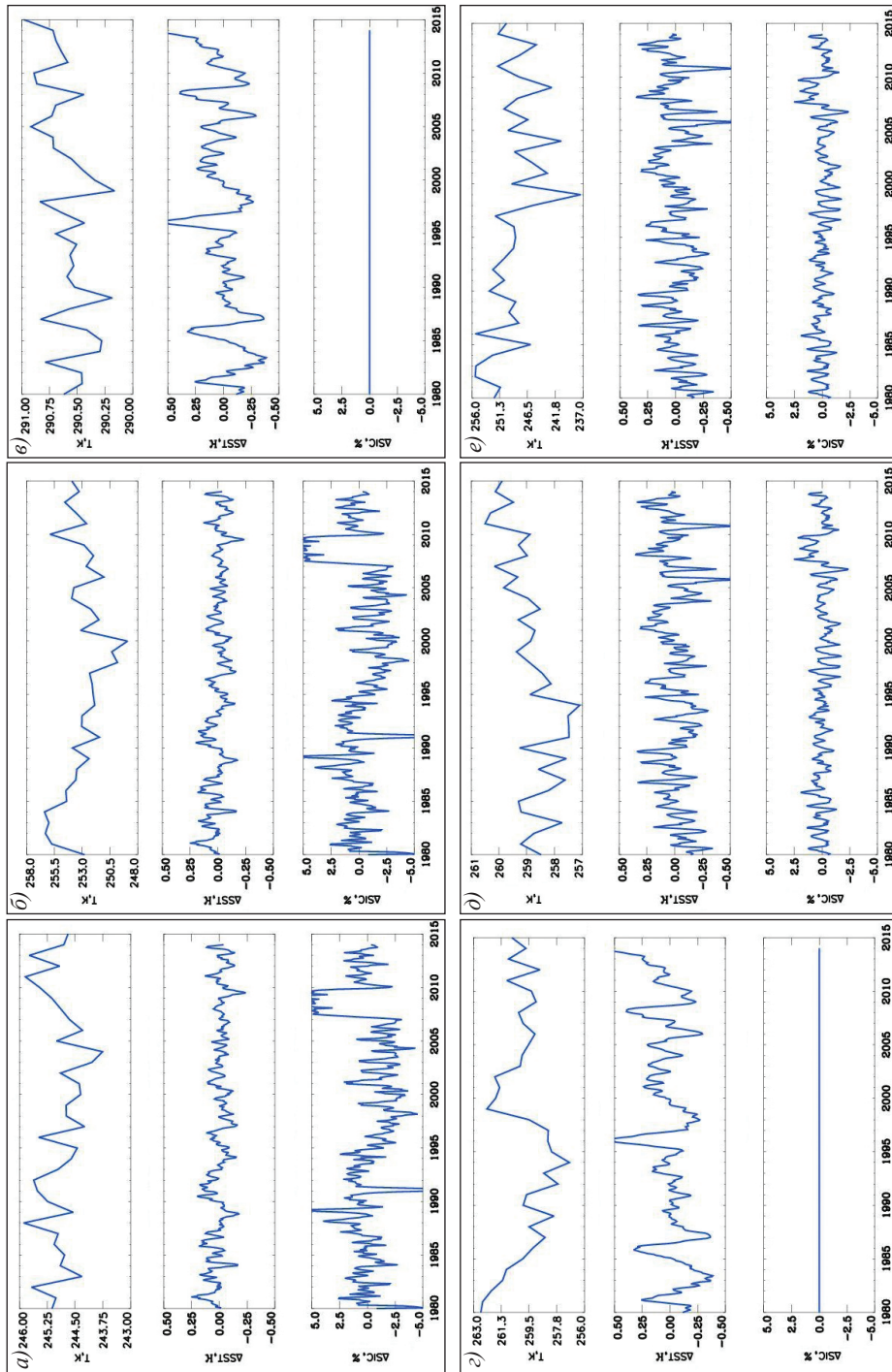


Рис. 9. Изменение температуры воздуха по данным ERA Interim (вверху), а также аномалий ТПО (посередине) и ППТ (внизу) для широты -88° и высоты 1,1 км (а) и 43 км (б), для широты 0° и высоты 1,1 км (в) и 43 км (г), и широты 88° и высоты 1,1 км (д) и 43 км (е).

по результатам моделирования изменений температуры воздуха нет, а по данным реанализа — наблюдается повышение температуры. Для стратосферы характерна тенденция понижения температуры, хотя по данным MERRA на Южном полюсе и по данным ERA Interim в экваториальной зоне также наблюдается резкое повышение температуры воздуха в период с 1995 по 2000 г. Для ТПО наблюдается тенденция понижения в Южном полушарии и повышения в Северном, для ППЛ — наоборот.

Что касается явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья, то оно происходит в тропической части Тихого океана. Поэтому его наибольшее влияние наблюдается в тропической зоне, что видно из рисунков 6—9 в. Во время Эль-Ниньо наблюдаются минимумы аномалий ТПО в 1986—1987, 1997—1998 и 2009—2010 г. (около $-0,25$), тогда как при Ла-Нинья — максимумы (около $0,5$). При этом в эти же годы наблюдается повышение средней температуры воздуха на $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Чем дальше от экватора и тропиков, тем слабее влияние Эль-Ниньо. В Северной и Южной полярных областях в эти годы происходят изменения температуры воздуха как в сторону повышения, так и в сторону понижения, что указывает на незначительное влияние явления Эль-Ниньо и Ла-Нинья. С увеличением высоты влияние Эль-Ниньо также становится слабее: в стратосфере в годы Эль-Ниньо происходят очень незначительные скачки температуры воздуха по результатам моделирования, но более значительные по данным реанализа.

Таким образом, можно прийти к выводу о том, что влияние Эль-Ниньо и Ла-Нинья наибольшее в тропических широтах в нижних слоях атмосферы, поскольку эти течения находятся в тропической части Тихого океана. Тем не менее они также оказывают некоторое влияние и на другие регионы земного шара, в том числе и на полярные. Также они оказывают определенное влияние на более верхние слои атмосферы. Это говорит о том, что явление Эль-Ниньо и Ла-Нинья, несмотря на региональный характер, имеет глобальные эффекты, поскольку в глобальном масштабе даже незначительные изменения параметров могут привести к значительным атмосферным явлениям и процессам.

Заключение

В настоящем исследовании было проведено четыре эксперимента с химико-климатической моделью с меняющимися данными о температуре поверхности океана и площади ледяного покрова. При этом в первых двух экспериментах один из параметров океана был зафиксирован, а шаг по времени составил 12 мин. Из-за ошибки отрицательного давления в 3-м и 4-м экспериментах, которые учитывали изменчивость во времени всех параметров океана, шаг по времени был уменьшен до 6 мин. Таким образом, 3-й и 4-й эксперименты дали более точный прогноз и правдоподобные результаты. Кроме того, было проведено сравнение с данными реанализа, которое также показало, что результаты 3-го и 4-го экспериментов являются наиболее правдоподобными.

Проведено исследование воздействия океана на атмосферу, которое проявляется, главным образом, в характере изменения температуры воздуха. Нижние слои атмосферы, согласно результатам моделирования, подвергаются воздействию океана в большей степени, чем верхние, что соответствует действительности. Температура

воздуха в тропосфере достаточно хорошо коррелирует с температурой поверхности океана. Также обнаружены тенденции повышения температуры с годами в тропосфере в Северном полушарии, а в стратосфере — тенденции понижения температуры с годами. Показано, что явление Эль-Ниньо и Ла-Нинья оказывает влияние на атмосферу. При этом наибольшее влияние этого явления наблюдается в тропосфере тропической зоны, поскольку Эль-Ниньо является региональным явлением, происходящим в тропической части Тихого океана. Однако некоторое влияние Эль-Ниньо оказывает и на другие области земной атмосферы. В полярных регионах и в стратосфере влияние Эль-Ниньо незначительно. Тем не менее наличие этого влияния говорит о глобальном характере процессов в атмосфере, связанных с явлением Эль-Ниньо, а значит, и о его влиянии на различные параметры атмосферы и ее химический состав в глобальном масштабе.

Используемая модель разработана в Институте вычислительной математики РАН и Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках государственного задания министерства образования и науки РФ (проект 5.6493.2017/БЧ). Изменение газового состава атмосферы Арктики и Субарктики моделировалось в рамках проекта Российского научного фонда (проект 14-17-00096). Сравнение процессов в северной и южной полярных зонах осуществлялось в рамках проекта РФФИ 17-05-01277-а.

Список литературы

1. Астафьева Н.М., Раев М.Д., Комарова Н.Ю. Региональная неоднородность климатических изменений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. II. С. 1—12.
2. Бендик А.Б., Яковлев В.Н. О сближении подходов к пониманию феномена Эль-Ниньо — Ла-Нинья // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. Вып. 1. С. 57—64.
3. Бондаренко А.Л. Новые представления о формировании явления Эль-Ниньо — Ла-Нинья // Meteoweb.ru. 2015.
4. Alekseev V.A., Volodin E.M., Galin V.Ya. Modeling the Present-Day Climate with the INM RAS Atmospheric Model. Preprint No. 2086-A98, IVM RAN (Moscow: Inst. of Numerical Math., 1998).
5. ERA-Interim [Electronic resource] / ECMWF Mode of access: <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>
6. Fleming E.L., Chandra S., Barnett J.J., and Corney M. Zonal Mean Temperature, Pressure, Zonal Wind and Geopotential Height as Functions of Latitude // Adv. Space Res. 1990. 10 (12). P. 11—59.
7. Galin V.Ya., Smyshlyaev S.P., Volodin E.M. Combined Chemistry–Climate Model of the Atmosphere // Atmos. Ocean. Phys. 2007. V. 43, No. 4. P. 399—412.
8. Guilyardi E., Wittenberg A., Fedorov A., Collins M., Wang C., Capotondi A., Oldenborgh G.J. van, Stockdale T. et al. Understanding El Nino in ocean-atmosphere general circulation models. Progress and Challenges // Amer. Meteorol. Soci. 2009. 90 (3). P. 325—340.
9. Historical El Nino/ La Nina episodes (1950-present) [Electronic resource] / United States Climate Prediction Center. 4 November 2015. Mode of access: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
10. JRA-55 — the Japanese 55-year Reanalysis [Electronic resource] / JRA project. Mode of access: http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html#news
11. Kalnay E. and Kanamitsu M., et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Met. Soci. 1996. 77. P. 437—471.
12. McPeters R.D., Bharita P.K., Krueger A.J., and Herman J.R. Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. — NASA Reference Publication 1384. 1996.

13. NASA MERRA [Electronic resource]. NCAR Climate Data Guide. Mode of access: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nasa-merra>
14. *Taylor K.E., Williamson D., Zwiers F.* The sea surface temperature and sea-ice concentration boundary conditions for AMIP II simulations. Program for climate model diagnosis and intercomparison. — University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, 2000, September.
15. *Taylor K., Williamson D., Zwiers F.* The sea surface temperature and sea-ice concentration boundary conditions for AMIP II simulations // PCMDI Report No. 60. 2000, September.
16. *Weather and climate change* [Electronic resource] / Met Office. Mode of access: <http://www.metoffice.gov.uk/>