

УДК 551.509.3, 551.583.1

DOI статьи: 10.17238/issn2221-2698.2016.24.39

Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата



© **Шерстюков Борис Георгиевич**, доктор географических наук, заведующий лабораторией исследования последствий изменения климата Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных. E-mail: boris@meteo.ru

Аннотация. Описаны свойства колебаний климата, полученные в результате специального статистического анализа данных наблюдений мировой метеорологической сети станций с учётом особенностей северных регионов. На примере температуры воздуха рассматриваются свободные и вынужденные колебания характеристик климатической системы в их взаимодействии. Сформулированы новые представления о структуре колебаний и возможных причинах изменений климата. Предложена статистическая модель периодической нестационарности климата для прогноза колебаний климата на два десятилетия и предложена модель для сезонных

и месячных метеорологических прогнозов с годовой заблаговременностью. Практическая значимость прогностических разработок особенно велика в суровых климатических условиях севера, где климат является одним из лимитирующих факторов промышленного развития северных регионов.

Ключевые слова: изменения климата, колебания климата, ритмы, прогноз климата, долгосрочные прогнозы, климат Арктики

The climatic conditions of the Arctic and new approaches to the forecast of the climate change

© **Boris G. Sherstyukov**, Doctor of Geographic Sciences, Chief of the laboratory for the research of climate change consequences, All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information — World Data Centre (RIHMI-WDC). E-mail: boris@meteo.ru

Abstract. The properties of climate variability are represented resulting from the special statistical analysis of observations of the world meteorological network of stations, taking into account the features of the northern regions. By the example of air temperature free and forced oscillation of characteristics of the climate system in their interaction are considered. There are formulated new ideas about the structure of the oscillations and the possible causes of climate change. A statistical model of a periodic nonstationarity of climate is suggested for forecasting climate variations for next two decades and there is suggested a model for monthly and seasonal weather forecasts for the next year. The practical importance of predictive research is particularly high in the harsh climate of the north, where the climate is one of the limiting factors of industrial development of the northern regions.

Keywords: climate change, climate variability, rhythms, climate forecast, long-term projections, the Arctic climate

Введение

Северные регионы Земли играют значительную роль в процессах, воздействующих на окружающую среду в глобальном масштабе, и служат индикаторами глобальных природных изменений, в особенности изменения климата. Наблюдаемые изменения в Арктике, такие как повышение температуры воздуха, сокращение ледяного покрова, увеличение стока рек и деградация многолетней мерзлоты, уже показывают, что на территории Арктики происходят самые большие изменения по сравнению с другими регионами Земли.

В существующей стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации одним из приоритетных направлений является комплексное социально-экономическое развитие региона¹. Суровые климатические условия Арктики в значительной мере препятствуют созданию там инфраструктуры и освоению обнаруженных больших запасов минеральных ресурсов Арктики. При этом самой большой и пока скрытой проблемой являются изменение климата и неопределённость его будущего состояния. Успешное освоение арктической зоны невозможно без надёжных прогностических оценок климата на несколько десятилетий вперед. Во всех арктических странах планы освоения арктической зоны построены исходя из реалий современного аномально тёплого климата, в период глобального потепления, в условиях уменьшения ледового покрова и открытия Северного морского пути и Западного прохода, а также на основе предположений о дальнейшем глобальном потеплении климата.

На самом деле о будущем климате арктического региона известно очень мало. Это объясняется недостаточностью наших знаний о причинах современных изменений глобального климата и в связи с особыми условиями формирования климата в высоких широтах Земли, которые усложняют построение надежных прогнозов будущего состояния климата Арктики.

Высокие широты Земли, Арктика, являются уникальным регионом в части формирования температурного режима. *Первая особенность* — климат Арктики формируется в условиях значительно меньшего притока тепла от Солнца, чем климат неполярных областей. На Земле севернее 70° географической широты солнце несколько месяцев не появляется (полярная ночь) и несколько месяцев не уходит за горизонт (полярный день). Большая отражательная способность снега и льда, а также преимущественно низкая высота солнца над горизонтом не позволяют сформировать тот температурный фон, который наблюдается в Арктике. Тепло арктического региона в значительной мере определяется количеством адвективного тепла, принесённого океаническими течениями и воздушными потоками из низких географических широт. Количество адвективного тепла в Арктике зависит от глобальных океанических и атмосферных циркуляционных процессов. *Вторая особенность Арктики* — это район с климатом, наиболее чувствительным к изменениям количества так называемых парниковых газов в атмосфере (водяной пар, углекислый газ, метан и др.) и количества облачности. Радиационный баланс в высоких широтах преимущественно отрицательный, а температурный режим определяется там, в основном, способностью атмосферы препятствовать тепловому излучению в космос пришедшего адвективного тепла. В средних и низких

¹ Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года (утверждена Президентом Российской Федерации 13.02.2013 г.). URL: <http://government.ru/media/files/2RpSA3sctElhAGn4RN9dHrtzk0A3wZm8.pdf> (дата обращения: 18.03.2016).

широтах иначе, там температурный режим определяется в основном количеством приходящей к поверхности земли солнечной радиации и мало зависит от парникового эффекта. При антропогенном увеличении парниковых газов в атмосфере эта особенность Арктики имеет особое значение. *Третья особенность* — вблизи географического полюса находится геомагнитный полюс, который создает в высоких широтах наиболее благоприятные условия для вторжения в атмосферу заряженных солнечных и космических частиц. Интенсивность потоков этих частиц зависит от переменной солнечной активности. Существует множество публикаций за последние несколько десятилетий, подтверждающих связь изменений погоды и климата с переменными потоками частиц при изменении солнечной активности, но механизм такой связи не объяснён.

Изменения климата Арктики усиливаются обратными связями, среди которых особое внимание привлекает деградация морских льдов в Северном Ледовитом океане, остро реагирующих на изменения климата. Вынос пресной воды из Северного Ледовитого океана влияет на распространение морских льдов, термохалинную циркуляцию в прилегающей акватории Северной Атлантики и через них на региональный и глобальный климат. Наличие нескольких переменных источников тепла, а также обратные связи между ними делают Арктику регионом наибольших изменений и колебаний климата. Многие особенности взаимосвязанных процессов остаются недостаточно изученными.

Изменения климата

Долгое время в современной истории климат считался неизменным по своей природе. Но в 1920-х гг. появилось много сообщений о признаках потепления в Арктике. Н.М. Книпович в 1921 г. выявил, что воды Баренцева моря стали заметно теплее [1, с. 10—12]. Сначала даже считалось, что это потепление касается только арктической области. Позднее было отмечено, что это было глобальное потепление. Особенностью потепления было то, что в высоких полярных широтах Северного полушария оно было выражено более чётко и ярко. Так, в Западной Гренландии температура повысилась на 5°C, а на Шпицбергене даже на 8–9°C за период от 1912—1926 гг. до конца 30-х гг. Наибольшее глобальное повышение средней температуры у поверхности Земли во время кульминации потепления составляло 0,6° С. Арктику образно называли «кухней погоды».

После 40-х гг. стала проявляться тенденция к похолоданию. Льды в Северном полушарии стали снова наступать. В первую очередь это выразилось в росте площади ледяного покрова Северного Ледовитого океана. С начала 40-х и до конца 60-х гг. площадь льда в арк-

тическом бассейне возросла на 10%. Первое потепление сменилось непродолжительным и несильным похолоданием в середине XX в.

С середины 1970-х гг. началось второе за историю инструментальных наблюдений глобальное потепление, которое получило совсем иную трактовку, связанную с усилением парникового эффекта от антропогенного повышения концентрации углекислого и других парниковых газов в атмосфере.

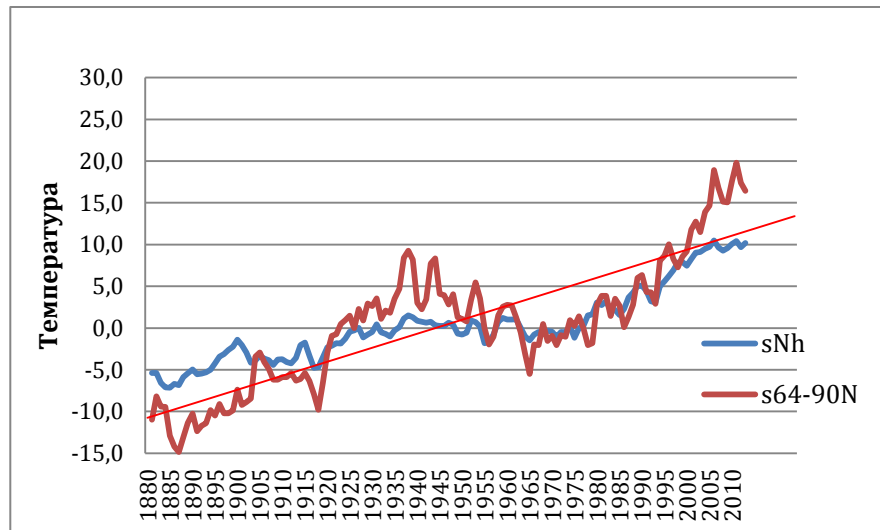


Рисунок 1. Температура воздуха в Арктике на широтах 64—90° СШ и в северном полушарии (сглажено по 3 годам)

На рис. 1 видны две волны потепления: первая в 1930-х гг. и вторая начиная с 1970-х гг. Но в некоторых авторитетных публикациях сам факт появления второй волны потепления климата долго оспаривался, вплоть до начала 1990-х гг., когда факт глобального потепления стал общепризнанным. При этом антропогенная гипотеза о причинах потепления стала главной. За признанием антропогенной гипотезы последовали прогностические сценарии ожидаемых однонаправленных и неизбежных катастрофических изменений климата к концу XXI в. Такие сценарии до сих пор считаются основными. Однако, с началом XXI в. глобальное потепление неожиданно сменилось, так называемой, паузой в потеплении — рост глобальной температуры остановился, как это уже было ранее на пике первого глобального потепления в 1930—1940-е гг. Острее стал вопрос: изменение или колебание климата мы наблюдаем?

Инструментальные наблюдения за температурой имеются преимущественно не ранее чем с конца XIX в., но в центральной Англии сведения о температуре известны с XVII в. Согласно этим данным в температуре всегда проявлялись долгопериодные колебания. Так, по данным о температуре в центральной Англии в доиндустриальную эпоху в XVII—XIX вв. наблюдалось три полных волны вековых колебаний климата, а во второй половине XX в. началась фаза потепления четвёртой волны, которая достигла максимума к концу XX в., но далее наступила

пауза, которая сохраняется уже более 15 лет. Что будет дальше? Если экстраполировать природные колебания, то в предстоящие десятилетия следует ожидать переход к фазе понижения температуры, а если верна антропогенная гипотеза, тогда потепление продолжится.

По данным спутниковых наблюдений со второй половины XX в. и до нашего времени, самая высокая температура тропосферы северного полушария наблюдалась в 1998 г., а дальше — пауза. Важно сравнить региональные особенности изменения климата до 1998 г. и после. Нами были вычислены значения коэффициентов линейной аппроксимации (линейных трендов) изменения температуры воздуха над сушей и температуры поверхности океана за два отдельных периода времени 1976—1998 и 1999—2014 гг. Расчёты были выполнены по данным наблюдений на метеорологических станциях северного полушария и по значениям температуры поверхности океана в узлах географической сетки 5х5 градусов. На интервале 1976—1998 гг. потепление наблюдалось на всей территории северного полушария. На значительных территориях, преимущественно над сушей, наибольшее потепление составляло $1,5 \div 2,0^\circ\text{C}/10\text{лет}$. После 1998 г. наступила пауза в глобальном потеплении, рост температуры сохранился только в Российской части Арктики и в районе Гренландии. А в Канадской части Арктики в последние 16 лет происходило понижение температуры.

Такое развитие событий не согласуется с прогностическими сценариями изменения климата, построенным по физико-математическим моделям климата [2], которые часто представляются как наиболее полные и надёжные для получения оценок будущего климата. Эти модели построены на предположении о парниковой природе изменения современного климата при антропогенном повышении парниковых газов в атмосфере. Другие возможные факторы изменения климата в этих моделях учесть не удалось из-за отсутствия понимания механизмов их влияния на климат. Но существует много публикаций, в которых внешние факторы рассматриваются.

О причинах изменений климата

Вопрос о причинах изменения современного климата остается дискуссионным. В настоящее время чаще признаются только четыре возможных фактора современных климатических изменений, происходящих как в глобальном, так и в региональном масштабе:

- a. Антропогенный эффект парниковых газов — главный фактор.
- b. Увеличение потока приходящей солнечной радиации (обычно игнорируется).
- c. Уменьшение роли аэрозольного рассеяния.
- d. Внутренние колебания климатической системы, состоящей из атмосферы, океана, гидросферы, суши и криосферы (игнорируется или рассматривается как второстепенный фактор).

Региональные изменения температуры воздуха всегда связаны с изменениями атмосферной циркуляции. Изменения в общей циркуляции атмосферы часто рассматриваются как

фактор климата. Атмосферная циркуляция не только перераспределяет тепло по планете, но и создает такие новые условия в глобальной атмосфере, которые сопровождаются колебаниями глобального климата. Изменения в атмосферной циркуляции могут быть длительными — климатического масштаба, поэтому атмосферная циркуляция может рассматриваться как фактор климата. Но при этом возникает вопрос о причинах изменения самой атмосферной циркуляции. В атмосферной циркуляции могут присутствовать как естественные собственные колебания, так и изменения или колебания под влиянием внешних факторов.

Потепление 30-х гг. XX в., вошедшее в историю как «потепление Арктики», было связано с увеличением продолжительности зональной циркуляции. Увеличение суммарной продолжительности перемещения атлантических циклонов вдоль побережья Евразии способствовало повышению температуры воздуха на прибрежных метеорологических станциях в Арктическом бассейне и в умеренных широтах. Наибольшая продолжительность зональной циркуляции отмечалась в десятилетие 1931—1940 гг. Это годы первого глобального потепления.

Второе глобальное потепление начинается с 1970-х гг. и хорошо согласуется с ростом продолжительности группы циркуляции с циклонами на полюсах. При этих макропроцессах в Северном и Южном полушариях происходят выходы циклонов из низких широт в высокие, что сопровождается повышением температуры в средних и высоких широтах.

Первое потепление было зональным и максимально проявилось в высоких широтах. Второе потепление оказалось более распространенным по разным широтным зонам. Оно достигло максимума в 1998 г. Похолодание началось после того, как в 1997 г. достигла максимума продолжительность группы циркуляции с циклонами на полюсах.

Наблюдаемые современные изменения климата хорошо согласуются с перестройками в общей циркуляции атмосферы. Н.В. Кононова [3, с. 11—35] обнаружила, что изменения среднегодовой глобальной температуры воздуха в течение XX — начала XXI в. находятся в противофазе с изменениями суммарной годовой продолжительности блокирующих процессов и в фазе с продолжительностью циркуляции определенного типа на полюсах. В настоящее время происходит рост продолжительности блокирующих процессов [3, с. 11—35] и наблюдается понижение температуры поверхности океана [4, с. 98—104], способствующие дальнейшему понижению глобальной среднегодовой температуры воздуха.

Возмущения в атмосферной циркуляции могут быть результатом вынужденных или собственных колебаний в климатической системе под влиянием внешних вынуждающих колебаний или эпизодических внешних воздействий. Атмосфера является наименее инертной составляющей климатической системы и подвержена многофакторным влияниям, как в про-

цессе взаимодействия с другими составляющими климатической системы, так и под воздействием внешних факторов. Из-за малой тепловой инерционности атмосферы, длительные процессы в ней могут формироваться только под действием внешних источников энергии.

Ближайшим источником энергии долгопериодных возмущений в атмосфере является теплообмен океан — атмосфера и процессы океанической циркуляции. Академик А.С. Монин указывал, что климат формируется под действием ряда факторов, которые можно разбить на три группы:

- a. внешние, или астрономические, факторы — светимость Солнца, положение и движение Земли в Солнечной системе, наклон оси вращения Земли к плоскости орбиты и скорость осевого вращения, определяющие воздействия на планету со стороны других тел Солнечной системы, её инсоляцию и гравитационные воздействия внешних тел, создающие приливы и колебания характеристик орбитального движения и собственного вращения планеты;
- b. геофизические и географические факторы — ряд особенностей планеты, из которых для климата Земли наиболее важными являются свойства подстилающей поверхности, которые определяют её динамическое и тепловое взаимодействие с атмосферой;
- c. атмосферные факторы — масса и состав атмосферы.

Возможно, перечень указанных известных и предполагаемых факторов изменений климата не является полным.

Антропогенный фактор потепления. В последние десятилетия наибольшее внимание было уделено антропогенному изменению состава атмосферы, как возможному фактору усиления парникового эффекта атмосферы и потепления климата во второй половине XX в. В публикациях международной группы экспертов по изменениям климата (МГЭИК) сделан вывод об антропогенном характере современного потепления, связанного с ростом концентрации CO₂, метана и других парниковых газов в атмосфере: «С высокой степенью вероятности можно утверждать, что наблюдаемое увеличение концентрации антропогенных парниковых газов обуславливает основную часть глобального потепления второй половины XX в. Основной вклад в глобальное потепление вносит двуокись углерода посредством парникового эффекта в атмосфере» [2]. Судя по большому количеству публикаций, на основе модельных оценок получен вывод о том, что быстрый рост выбросов парниковых газов является следствием интенсификации человеческой деятельности. Как раньше, так и в последнее время особенно, всё больше появляется публикаций, в которых приводятся альтернативные гипотезы.

Вывод МГЭИК основан на оценках, полученных в результате физико-математического моделирования в предположении того, что модели учитывают все факторы и адекватно отражают все процессы с их многосторонними прямыми и обратными связями во всех составляющих климатической системы. Хотя заведомо известно, что модели далеки от совершенства. Первое сомнение в безоговорочной антропогенной природе современного потепления

основано на исторических фактах о климатах прошлого, согласно которым подобные и более сильные потепления климата наблюдались много раз в прошлом и каждый раз позднее сменялись похолоданием. Это происходило в доиндустриальную эпоху.

По данным академика В.М. Котлякова концентрация парниковых газов и глобальная температура в прошлом изменялись согласовано, как это следует из анализа ледяных кернов за несколько столетий, а содержание газов в атмосфере действительно резко возросло за последние 100 лет, но современные изменения температуры не выходят за рамки её естественных исторических флуктуаций в доиндустриальную эпоху. Концентрация CO_2 в атмосфере подвержена природным колебаниям. По известным законам физики, в зависимости от температуры верхнего слоя океана, CO_2 или усиленно растворяется в океане при похолодании или выделяется из океана в атмосферу при потеплении. По этим данным изменение концентрации CO_2 в атмосфере можно рассматривать как следствие потепления, а не его причину.

По данным академика Р.И. Нигматулина [5, с. 1—8] величины природных потоков CO_2 из океана в атмосферу и из атмосферы в океан многократно превышают выбросы CO_2 в результате человеческой деятельности. Можно ли быть уверенным, что существующие несовершенные модели океана с такой исчерпывающей точностью описывают состояние верхнего слоя океана, чтобы правильно оценить баланс естественных длительных колебаний концентрации CO_2 и оценить влияние исключительно антропогенной добавки CO_2 в изменения климата? Признавая наличие антропогенной составляющей в современных изменениях климата, нельзя отбрасывать наличие естественных колебаний климата, которые всегда были и остаются.

По мнению академика В.М. Котлякова [6, с. 44—47], «Каковы бы ни были антропогенные изменения климата, они накладываются на его естественные вариации, масштаб которых всё ещё сильно превосходит влияния, обусловленные эмиссией парниковых газов. ... Понимание и предсказание последствий роста концентрации парниковых газов в атмосфере (так называемое глобальное потепление вследствие парникового эффекта) требует понимания естественной изменчивости природных процессов, на которые накладывается антропогенное влияние».

По данным наблюдений на полутора тысячах метеорологических станциях России автором [7] были выполнены исследования вклада повышения концентрации CO_2 во второй половине XX в. в изменения температуры воздуха. Проводились статистические эксперименты, в которых нивелировались влияния адвекции тепла, парникового эффекта водяного пара и облачности в изменениях температуры воздуха на разных широтах и в разных сезонах, и

оценивалась зависимость оставшихся изменений температуры от радиационного баланса у поверхности земли. После исключения перечисленных природных факторов, изменения радиационного баланса и температуры могли происходить, в основном, из-за изменения концентрации CO_2 в атмосфере. Оказалось, что вклад CO_2 в общую изменчивость температуры воздуха составил около 25%. Данные наблюдений подтвердили факт влияния повышенной концентрации парниковых газов на климат, но одновременно показали, что оценки физико-математических моделей о доминирующей роли усиления парникового эффекта в потеплении климата во второй половине XX в. были сильно завышены.

Солнечная активность. Климат Земли является, прежде всего, результатом воздействия Солнечной энергии при существующих астродинамических параметрах Земли. Поэтому первыми двумя условиями постоянства климата является сохранение светимости Солнца и параметров орбиты Земли. На самом деле ни то, ни другое не остаётся строго постоянным, наблюдаются малые вариации. В начале 1980-х гг. была обнаружена переменность солнечной постоянной с амплитудой 0,1-0,2%, связанная с 11-летним солнечным циклом. Уменьшение солнечной постоянной связано с появлением на Солнце очень больших групп пятен, а слабое увеличение — с солнечными факелами. При высокой солнечной активности на Солнце увеличивается число пятен (солнечные пятна — тёмные образования), от площади которых в некоторой мере зависит солнечная постоянная. Появление на диске Солнца пятен и факелов объясняет лишь 50-70% всех наблюдаемых вариаций солнечной постоянной. Возможными причинами циклической переменности солнечной постоянной могут быть также изменения диаметра Солнца. По данным Х.И. Абдусаматова [8], изменения солнечной постоянной составляют 0,07%. Вопрос о влиянии столь малых вариаций солнечной постоянной остаётся дискуссионным и сводится к вопросу о чувствительности климатической системы к таким вариациям.

Изменением светимости Солнца не исчерпывается явление, которое называют изменением солнечной активности. Солнце также является источником потоков заряженных солнечных частиц, и модулятором потоков космических лучей, которые воздействуют на магнитосферу и верхнюю атмосферу Земли, особенно в высоких широтах, и способны создавать возмущения в атмосферной циркуляции с вытекающими последствиями для погоды и климата.

Астродинамический фактор. Не менее важную роль в вариациях климата играет количество поглощённой радиации поверхностью Земли. С астрономической точки зрения поглощение Землёй пришедшей Солнечной энергии определяется, прежде всего, углом падения солнечных лучей на поверхность Земли, который зависит от угла наклона земной оси к

эклиптике. В результате взаимодействия Земли с Луной и планетами возникают вариации в параметрах орбитального движения Земли и наклона земной оси. При этом изменяются условия поглощения солнечной радиации, изменяется длительность сезонов и, соответственно, изменяется суммарный за год приток солнечного тепла в климатическую систему. Астродинамические условия — основа формирования радиационных составляющих климата планеты. Вариации в параметрах орбитального движения Земли и наклона Земной оси могут сопровождаться не только радиационными, но и динамическими возмущениями во всех оболочках Земли. Земля всегда испытывает переменные повторяющиеся гравитационные воздействия со стороны других тел Солнечной системы. В результате таких воздействий составляющие движения Земли никогда не остаются постоянными. Возмущения могут сильно отличаться по величине и иметь разный временной масштаб от нескольких дней до многих тысячелетий. Величины возмущений параметров движения Земли зависят от массы возмущающих тел и от расстояния от них до Земли. Поэтому в движении Земли наиболее сильные возмущения определяются ближайшими телами, такими как Луна, Венера, Марс и массивный Юпитер. Влияние огромного Сатурна слабее из-за его большой удалённости.

Гравитационное взаимодействие Земли с планетами и Луной создает вариации в скорости движения Земли по орбите, в северо-южном и радиальном отклонениях от нормальной орбиты, создает прецессию и нутацию земной оси, изменяет скорость вращения Земли вокруг своей оси. В процессе взаимодействий изменяется расстояние от Земли до Солнца. Это как раз те параметры, которые определяют космическую (главную) часть процессов, формирующих климат Земли. Вопрос заключается в том, являются ли эти вариации настолько существенными, чтобы заметно влиять на колебания климата Земли.

Резонансы в солнечной и климатической системах. Климатическая система во всех её параметрах проявляется как сложная колебательная система со многими нелинейными взаимодействиями. За миллионы лет климатическая колебательная система прошла несколько этапов эволюции. Независимо от своей природы нелинейные колебательные системы в ходе динамической эволюции проявляют тенденцию выходить на особый синхронный режим движения. Из теории колебаний известно, что совокупность изолированных друг от друга объектов, совершающих колебания с различными частотами, при наложении иногда даже очень слабых связей переходит в такой режим движения, при котором частоты объектов становятся равными, кратными или находящимися в рациональных отношениях. В процессе синхронизации помимо соизмеримости частот устанавливаются также определенные фазовые соотношения между колебаниями [9, с. 34—48]. Соизмеримости между частотами

— очень частое явление в реальной солнечной системе. Гипотеза о резонансной структуре солнечной системы является частью общей теории поведения сложных колебательных систем. Резонансы могут возникать и в колебаниях характеристик климатической системы. В этом случае они могут стать в климатической системе основой ритмов разной длительности и частот, а также причиной долгопериодных изменений в параметрах климатической системы (гипотетически могут быть одной из причин колебаний климата).

При изучении эволюции нелинейных колебательных систем следует принимать во внимание всегда существующие в реальных условиях диссипативные силы. Эти силы направлены на погашение взаимодействующих колебаний, хаотических по отношению друг к другу. Но эти же силы приводят к резонансному усилению колебаний, находящихся между собой в рациональных соотношениях. Силы взаимодействий могут быть больше или меньше (от их величины зависит скорость эволюции), от этого зависит скорость выхода системы в стационарный резонансный режим. Конечное стационарное состояние системы, достигаемое к концу эволюции, обязательно должно быть резонансным. Эволюционно зрелые колебательные системы неизбежно резонансны, а их строение задано, подобно квантовым системам, набором целых чисел. В реальном времени диссипативными силами можно пренебречь, но в эволюционном масштабе времени накапливающиеся эффекты малых диссипативных сил становятся определяющими [9, с. 34—48].

По аналогии с резонансной структурой солнечной системы, малые вариации орбиты Земли и столь же малые внешние воздействия на климатическую систему должны в результате длительной эволюции привести колебательные характеристики климатической системы к некоторому резонансному состоянию, синхронизированному с планетными конфигурациями и циклами Солнечной активности (гипотеза). Прежде всего, синхронизация должна наступить между циклическими внешними воздействиями и собственными частотами какой-либо одной из составляющих климатической системы или нескольких из них. А далее внутри климатической системы в результате взаимодействий должны установиться колебания на собственных (резонансных) частотах в отдельных составляющих климатической системы.

Для Солнечной системы эволюционный масштаб времени составляет миллиарды лет. Можно предположить, что для климатической системы эволюционный масштаб времени значительно меньше, учитывая более тесные внешние и внутренние связи. Если синхронизация колебаний между элементами климатической и солнечной систем уже произошла, тогда они должны иметь соизмеримые частоты колебаний при отсутствии прямых энергетических соотношений. Подкреплением этой гипотезы являются многочисленные свидетельства о статисти-

ческих связях колебаний климата с внешними факторами при отсутствии энергетически обеспеченных соотношений. Недостаток энергии для прямого воздействия внешнего фактора на климат может заменяться многократным слабым резонансным воздействием.

Такой взгляд на природу колебаний в климатической системе существенно расширяет представления о причинно-следственных связях, о необходимых физико-математических соотношениях взаимодействий в климатической системе и о влиянии внешних факторов на климатическую систему.

Прогноз изменения климата на основе физико-математического моделирования

По заключению международной группы экспертов по климату [2] во второй половине XX в. антропогенное увеличение концентрации CO₂ в атмосфере создало условия для повышения температуры воздуха за счет усиления парникового эффекта. Если это утверждение верно и потепление является следствием антропогенного воздействия на климатическую систему, то дальнейшая индустриализация общества неизбежно приведет к катастрофическим последствиям. В связи с этим проблема прогноза будущего состояния климата стала одной из главных проблем человечества в современных условиях.

Заключение экспертов построено на основе сценариев изменения климата, полученных в результате построения физико-математических моделей климата. В мире уже построено несколько десятков моделей пятого поколения, претендующих на достоверность. На рис. 2 приведены графики глобальной температуры, полученные по ансамблю моделей третьего поколения (CMIP3) и пятого поколения (CMIP5), а также показан график изменения фактической глобальной температуры, вычисленной по наблюдениям (observations). Отклонение сценариев от прогностического трендового значения температуры составляет $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$. Учитывая, что потепление глобального климата за 100 лет составило $0,76^{\circ}\text{C}$, при разбросе возможных сценариев на сопоставимую величину ($\pm 0,4^{\circ}\text{C}$) можно утверждать, что надёжность таких прогнозов изменения климата не соответствует их стратегической значимости.

При таком широком диапазоне возможных сценариев сама величина прогнозируемой тенденции изменения климата не имеет особого смысла. Важно определить хотя бы направление будущих изменений. В XX в. уверенно прогнозировалось дальнейшее экспоненциальное повышение температуры до конца XXI в. Но за последние 17 лет потепление климата сильно замедлилось, возникла пауза в росте температуры. Пауза в потеплении, началась после 1998 г. Ожидаемое повышение температуры до $1,1^{\circ}\text{C}$ к 2015 г. не оправдалось (см. рис. 2), после 2000 г. красная прогностическая кривая на графике значительно выше чёрной кривой фактических значений температуры. А что будет к концу XXI в.?

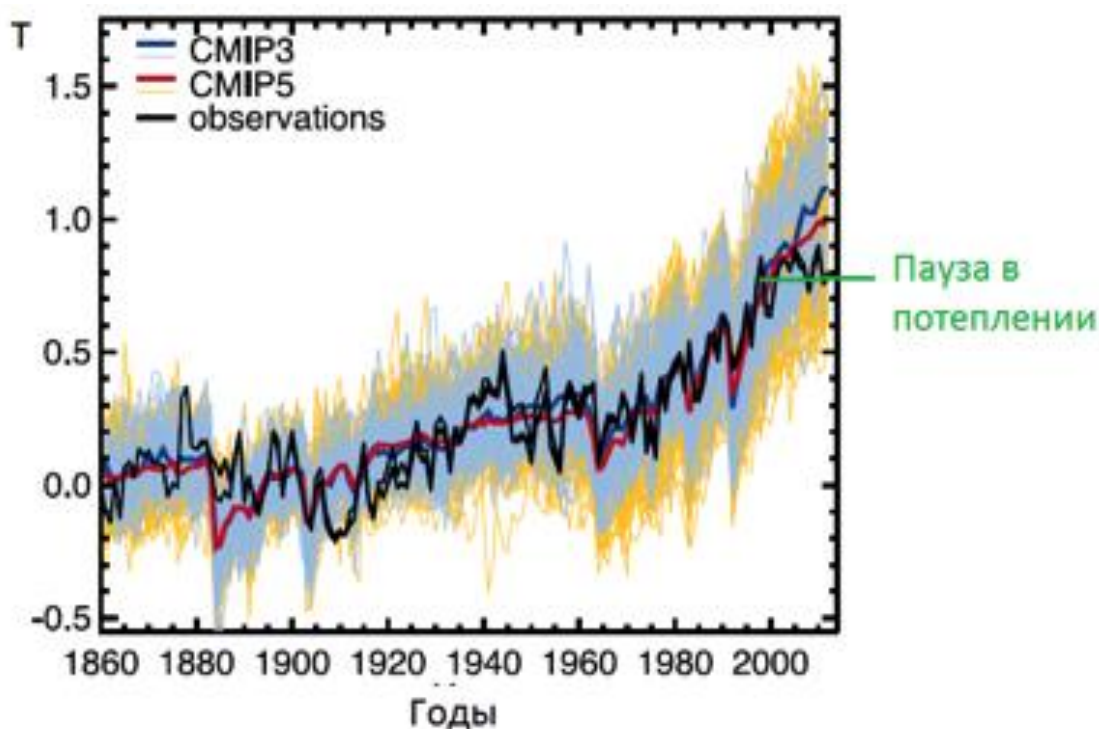


Рисунок 2. Глобальная температура (Т), вычисленная по физико-математическим моделям третьего (CMIP3) и пятого поколения (CMIP5), а также фактическая глобальная температура, вычисленная по наблюдениям (observations) за 1860-2015 гг. [3]

По данным МГЭИК, к концу XXI в. ожидается беспрецедентное потепление. На рис. 3 показана тенденция ожидаемого изменения климата по версии МГЭИК и коридор неопределенности такого прогноза, возникающий из-за неопределённости самой модели и неопределённости антропогенного воздействия на парниковые газы [2]. Из рис. 3 видно, что ширина коридора неопределённости вдвое превышает величину прогнозируемого повышения глобальной температуры. Аналогичная ситуация и для региональных прогнозов, включая Арктику. Можно ли строить стратегические планы освоения севера на основе столь неуверенных прогнозов? Пробелы в глубоком понимании некоторых процессов в климатической системе и воздействующих на нее факторов являются основной причиной существенной неопределённости в прогнозировании тенденций изменения климата по современным моделям. В таких условиях оправдан другой подход — исследование закономерностей изменения и колебаний климата, по данным наблюдений, и их экстраполяция.

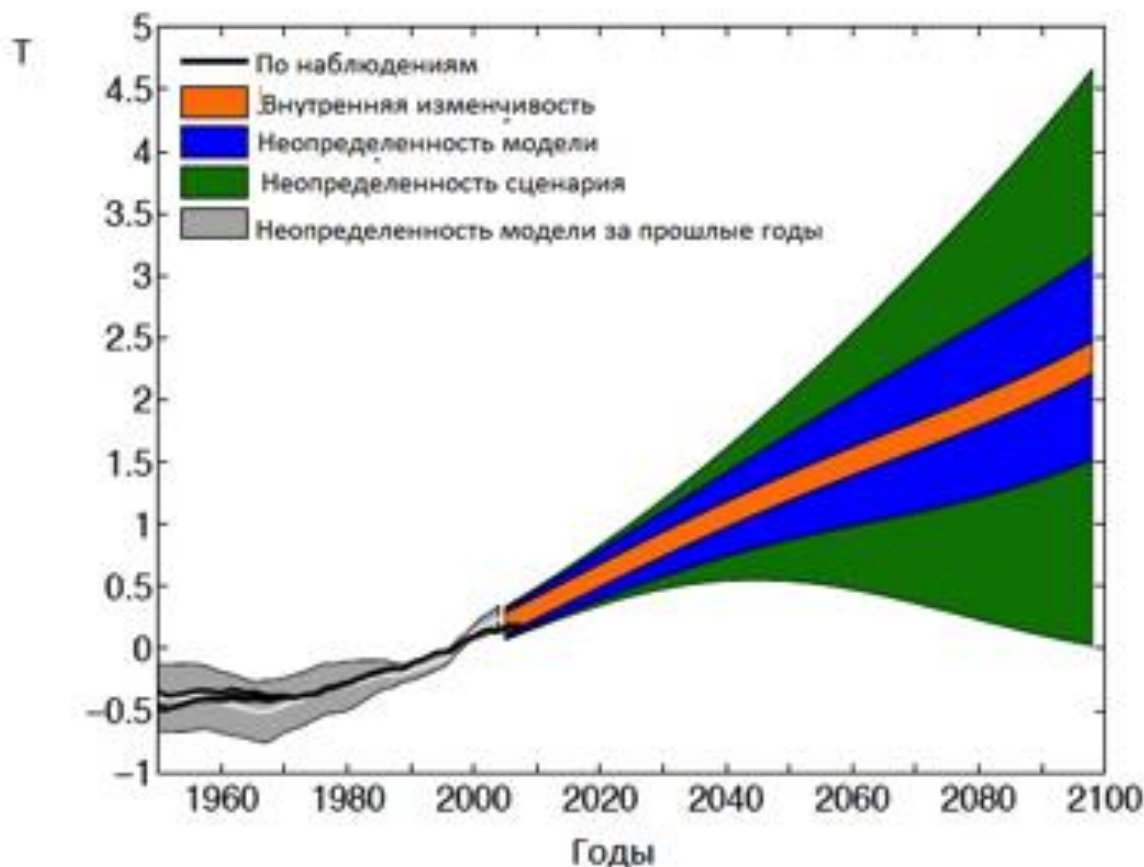


Рисунок 3. Прогноз тенденции изменения глобального климата по версии МГЭИК [3] и его неопределённость по разным причинам

Статистическая модель для прогноза колебаний климата

Физико-математические модели являются желанной целью описания всех физических процессов в климатической системе, но в настоящее время они ограничены недостаточностью знаний о физических процессах и механизмах, ответственных за колебания и изменения климата. Поиски закономерностей во временных рядах метеорологических характеристик ведутся давно и недостаточно удачно. Отсутствие четких представлений о причинах формирования колебаний в атмосферных характеристиках и неудачные опыты поиска закономерностей в колебаниях климата многие годы приводили исследователей к поспешным выводам о случайности всего происходящего в атмосфере. Действительно, в природе нет тех простых закономерностей, которые многие годы были предметом поиска в статистическом анализе. Например, если возникала гипотеза о повторяющихся возмущениях во временном ряде, то методом спектрального анализа оценивалась достоверность периодических процессов. При этом для большей надежности результатов в анализе использовался максимально возможный по длительности временной ряд. В результате получался статистически достоверный, но методически ошибочный вывод о том, что колебания во временном ряде не являются периодическими, а значит, они случайны. Методических ошибок в таком анали-

зе было несколько. *Во-первых*, повторяющиеся возмущения не обязательно должны быть периодическими — это может быть серия взаимосвязанных возмущений через разные промежутки времени. *Во-вторых*, даже периодические возмущения не обязательно должны существовать бесконечно долго, как это желательно для надежности получения статистических оценок. *В третьих*, периодические колебания при наложении дополнительных факторов могут со временем изменять знак или фазу, период может постепенно растягиваться или сжиматься. Например, на границе океан-атмосфера неизбежно происходят медленные изменения периода колебаний потоков тепла вместе с изменением тепловой инерционности верхнего слоя взаимодействия океана с атмосферой, а инерционность изменяется в зависимости от изменяющейся толщины верхнего слоя перемешивания и объёма верхнего слоя воды, участвующего в теплообмене.

К настоящему времени накоплено много сведений о поведении климатической системы, из которых вытекает необходимость создания других методов для поиска закономерностей и для построения статистической модели.

Теоретические предпосылки модели. Глобальный и региональный климат на разных временных масштабах может характеризоваться изменением его состояния и колебаниями. Следует учитывать, что колебания в атмосфере бывают собственные и вынужденные и что свойства их различны. Собственными или свободными называются колебания, которые совершает система около положения устойчивого равновесия после первоначального возмущения. Частоты этих колебаний определяются свойствами самой системы и не зависят от периодичности повторяющихся воздействий на систему. Собственные колебания совершаются только за счёт внутренних сил противодействия первоначальному возмущению (наличие возмущающего фактора обязательно). Это важнейшее свойство независимости собственных частот колебаний климатической системы от периода внешних воздействий обычно не принималось во внимание.

Вынужденные колебания — это колебания, происходящие под воздействием переменных внешних сил. При исследованиях колебаний необходимо учитывать, что вынужденные колебания имеют частоту колебаний вынуждающих воздействий, а свободные колебания имеют собственные частоты, присущие системе, которые связаны с возмущающим воздействием только временем начала. В момент возмущающего воздействия запускаются затухающие колебания системы на собственных частотах. Это основополагающее положение для построения статистической модели.

Атмосфера — наименее инерционная составляющая климатической системы и потому она наиболее легко реагирует на внешние изменения (воздействия). Её реакция проявляется во всём спектре её собственных частот. Воздействие на атмосферу каждого возмущения от разных составляющих климатической системы и от внешних факторов сопровождается каждый раз запуском новой серии собственных возмущений в атмосфере. Колебания на собственных частотах при каждом новом запуске имеют новую фазу колебаний (это принципиально влияет на метод выделения периодичностей). Происходит наложение новых колебаний на затухающие старые колебания. При этом возникает интерференция, биения и т.д. Выделить из них периодические изменения часто не удаётся.

При всей сложности и многофакторной зависимости процессов в климатической системе, колебания в атмосфере некоторым образом все же самосогласуются и возникают ритмы, которые легче поддаются выделению. Атмосфера имеет климатическую память около двух недель, поэтому многолетние колебания климата нельзя отнести только на счёт её колебаний на собственных частотах. Долгопериодная устойчивость атмосферы поддерживается другими составляющими климатической системы. Океан можно гипотетически рассматривать как возможный ближайший источник долгопериодных ритмов, задающих серии непериодических возмущений в атмосфере, как результат интерференции, биений и резонансов. При этом нельзя исключать из рассмотрения другие прямые возможные источники ритмов в атмосфере, таких как неравномерность углового вращения Земли, возмущения в орбитальном движении Земли, другие геодинамические факторы и внешние воздействия.

Основным источником знаний о климатической системе являются данные наблюдений за климатической системой и накопленные ряды данных таких наблюдений. В любой заданный первоначальный момент времени поле параметров климатической системы, включая океан, содержит градиенты, которые в некоторый начальный момент задают толчок всем процессам системы в направлении выравнивания градиентов, подобно маятнику, который перед запуском был отклонен от вертикали и начал движение. В этом движении система, так же как и маятник, проходит точку равновесия по инерции и уходит от равновесия в другую сторону. Затем начинается движение в обратную сторону, опять в направлении к равновесию. Так начальные градиенты задают затухающие колебания климатической системы на собственных частотах. Появлению начальных градиентов в характеристиках климатической системы всегда предшествует некоторое внешнее воздействие. Статистическая модель должна экстраполировать моменты появления внешних воздействий и возникающие после этого серии затухающих колебаний. Разные компоненты имеют разную инерционность, поэтому в

климатической системе возникают колебания разной длительности. В глубинных процессах океана и в ледяном покрове периоды колебаний могут достигать тысячелетий.

Исследования ритмической структуры характеристик климата (преимущественно температуры) на основе данных наблюдений мировой метеорологической сети позволило автору построить статистическую модель регионального климата, в которой охватываются все регионы Земли. Прогностической основой модели является метод выделения скрытой периодичности, предложенный автором в 2007 г. [10, с. 14—26].

Модель периодической нестационарности

В атмосфере, как и во всех нелинейных системах, в результате внешних долгопериодных воздействий возникают короткопериодные возмущения на собственных частотах атмосферы. Суперпозиция нескольких колебаний на собственных частотах проявляется в атмосфере как череда возмущений, которые с кажущейся хаотичностью возникают на интервале от одного внешнего воздействия до другого. При каждом следующем внешнем воздействии вся череда, казалось бы, хаотических колебаний может повторяться. Такие возмущения подходят под определение ритмических. Ритм — чередование каких-либо элементов, происходящее с определенной последовательностью. В природе существует полиритмичность. Однако многие из ритмов в климатической системе выражены слабо и обнаруживаются только при специальном анализе. При перестройках процессов могут возникать новые доминирующие ритмы, которых не было прежде. Суперпозиция ритмов обуславливает сложную форму колебаний значений во временных рядах. Таким образом, статистическое моделирование должно быть направлено на описание закономерностей долгопериодных воздействий и на описание следующих за ними свободных колебаний на собственных частотах. При такой постановке задачи заведомо предполагается, что на выходе модели будут колебания с частотами, отличными от частоты внешних (по отношению к атмосфере) возмущений. Предполагается, что после каждого внешнего воздействия на атмосферу в ней будут возникать серии непериодических возмущений в определенной строгой своей последовательности (результат суперпозиции колебаний на собственных частотах). После каждого нового внешнего воздействия в атмосфере будет возникать серия новых возмущений, начиная с новой фазы.

Со статистической точки зрения вынужденные колебания можно описать моделью периодической нестационарности (терминология из [11]). Периодические вынуждающие колебания в каждом периоде задают серию непериодических вынужденных возмущений. Принято считать [11], что временной ряд обладает периодической нестационарностью, если весь ряд и любой его отрезок не стационарны, но ряд делится на такие равные отрезки дли-

тельностью τ , при котором каждому значению метеовеличины на одном отрезке найдётся равное или близкое ему значение через τ единиц времени в следующем отрезке:

$$t_1 \approx t_{\tau+1}; t_2 \approx t_{\tau+2}; t_3 \approx t_{\tau+3}; \dots t_{\tau} \approx t_{2\tau} \text{ и т.д.}$$

Если периодическая нестационарность существует в параметрах атмосферы, тогда задача прогноза температуры воздуха сводится к выявлению периода нестационарности τ — периода вынуждающих воздействий. Вынуждающие воздействия на атмосферу через равные промежутки времени задают ритмы для серий колебаний характеристик атмосферы на собственных частотах. На практике вынуждающие силы всегда неизвестны достоверно. По данным метеорологических наблюдений мы имеем только серии из суперпозиции собственных колебаний сложной формы. И по этим сериям возмущений необходимо выделить период τ скрытых вынуждающих ритмозадающих колебаний.

Если бы τ было известно, тогда временной ряд температуры можно бы разбить на отрезки длительностью τ , где τ — период вынуждающих колебаний. То есть, при известном τ ряд можно разбить на несколько отрезков так, что каждому члену ряда t_i найдется равный или близкий ему член $t_{i+\tau}$, где τ — период вынуждающих воздействий. Серия значений $t_1, t_2, \dots t_n$ метеорологической величины (температуры) может быть любой сложности — периодической или непериодической с переменными фазой и амплитудой.

Период τ необходимо искать эмпирически, перебирая все его возможные значения, проверяя сходство возмущений в соседних отрезках временного ряда. В общем случае, работа начинается с поиска периода τ повторения серии непериодических возмущений метеорологических величин, которые являются следствием вынуждающих воздействий. Как правило, ритмы в атмосфере прослеживаются 2-3 раза и далее размываются, поэтому тестирование проводится на последнем интервале временного ряда данных наблюдений общей длительностью 3τ . Другие данные не используются на данном этапе. Элементами этого интервала-ряда будут значения от t_1 до $t_{3\tau}$. При каждом тестируемом значении τ анализируемый ряд разбивается на три отрезка длительностью τ . Если номером 1 обозначить первый элемент ряда t и увеличивать номер с шагом 1, то будут получены отрезки по следующим элементам ряда: первый отрезок — от t_1 до t_{τ} , второй отрезок — от $t_{\tau+1}$ до $t_{2\tau}$, третий отрезок — от $t_{2\tau+1}$ до $t_{3\tau}$. Значение $t_{3\tau}$ является последним членом ряда наблюдений. По данным на первом и втором отрезках времени вычисляется осредненный эталон возмущений температуры на тестируемом отрезке времени длительностью τ . Значениями этого эталона будут:

$$T_1 = (t_1 + t_{\tau+1})/2; T_2 = (t_2 + t_{\tau+2})/2; T_3 = (t_3 + t_{\tau+3})/2 \text{ и т.д. до } T_{\tau} = (t_{\tau} + t_{2\tau})/2.$$

Изменения температуры t_i на третьем (последнем) отрезке времени сравнивались с изменениями T_i в полученном тестируемом эталоне ($i = \overline{1, \tau}$). Их сходство оценивалось по коэффициенту корреляции. После проведения аналогичных вычислений при всех возможных тестируемых значениях τ , определялась длительность отрезка τ , при которой сходство изменений в первом отрезке и в тестируемом эталоне было максимальным по значению коэффициента корреляции. Если наилучший коэффициент корреляции статистически достоверен, то, согласно гипотезе о ритмах, период τ — это время, через которое серия непериодических колебаний повторяется на интервале τ . При этом вся сложная суммарная картина колебаний становится прогнозируемой на τ значений вперед. Выделение и экстраполяция ритмов составляют суть статистической модели климата.

На практике оказывается, что выделение одного значения τ недостаточно. На региональную температуру воздуха одновременно воздействует много разных факторов со своей системой ритмов. Набор этих ритмов изменяется в зависимости от сезонных, циркуляционных, физико-географических и других условий. Поэтому проводится многократный поиск ритмов и из них выделяется такая совокупность ритмов, которая наилучшим образом описывает изменения температуры в годы, ближайšie к последнему году перед прогнозом.

Каждый прогноз строится на основе ритмов, выделенных для данной станции и месяца. Наборы ритмов складываются различные. Предварительный анализ показал, что в январе по станциям России преобладают ритмы 5, 13, 18, 35-37 лет, в декабре 8, 11, 18 и 35-37 лет, в другие месяцы выделяется, как правило, до 5-6 ритмов в интервале 3-18 лет. 18-летний ритм имеет наибольшую повторяемость в январе, июле — августе, в сентябре — октябре и в декабре, иногда его сменяет такой же сильный ритм 17 или 19 лет. В тех случаях, когда нет 17-19 летнего ритма, появляется 16-летний ритм, в основном, это бывает в первой половине года. 10-11 летний ритм по всем проявлениям соответствует 10-11 летнему циклу солнечной активности. Ритм 10-11 лет прослеживается только в холодное полугодие. Это хорошо известный факт, описанный в литературе — солнечно-атмосферные связи более устойчивы в холодное полугодие. Усиление повторяемости 11-летнего ритма в марте — апреле согласуется с известным фактом о том, что в эти месяцы, а также в октябре-ноябре складываются благоприятные условия взаимодействия геомагнитного поля с межпланетным магнитным полем, при которых облегчается вторжение солнечных корпускул в атмосферу Земли при усилении солнечной активности. 8-9-летний ритм по устойчивости подобен 18 летнему циклу, иногда (в июне и в августе) 8-9-летний ритм заменяется 7-летним ритмом. Оба этих

ритма совпадают с особенностями взаимодействий Земли с Луной. 4-летний ритм иногда переходит в 3-х или 5-ти летний ритм.

Из перечисленных длительностей ритмов можно сделать поспешный вывод о том, что случайным образом выделяются любые ритмы в интервале 4-18 и более лет. На самом деле, состояние климата каждого конкретного месяца года описывается некоторым ограниченным согласованным ансамблем ритмов, длительность каждого из которых может немного варьировать в разные годы. Всегда ансамбль ритмов не сильно отличается от набора 4-6, 8, 11, 18, 35 лет, происхождение которых предстоит изучать. Большое разнообразие ритмических волновых движений в атмосфере обусловлено влиянием сил различного происхождения.

Итак, на основе анализа данных наблюдений за колебаниями климата у автора сформировался новый взгляд на свойства природных колебаний характеристик климатической системы, и разработана статистическая модель выделения скрытых ритмов в атмосфере с их последующей экстраполяцией во времени. Исследования оправдываемости прогностических значений температуры воздуха по модели показали, что модель позволяет составлять прогностические оценки колебаний климата на 2 десятилетия вперед.

Оправдываемость прогноза колебаний климата

Выше упоминалась пауза в потеплении глобального климата, начиная с XXI в., которая не была предсказана лучшими физико-математическими моделями климата. На самом деле на основе статистической модели замедление потепления климата было предсказано ещё в 2007 году. Прогноз был опубликован в печатном виде в монографии [7] (доступен на сайте http://meteo.ru/publish_tr/monogr2/glava7.pdf) и в автореферате диссертации автора [12]. В главе 7 монографии [7] от 2008 г. показано, что на основе экстраполяции природных ритмов ожидается замедление потепления на интервале до 2025 г. На рис. 4 представлен прогностический график температуры, который был опубликован в 2008 г. На графике линия тренда показывала ожидаемую паузу в потеплении климата, жирная кривая — прогноз погодичных изменений температуры. Теперь прогноз можно оценить.

Наилучшей независимой проверкой точности прогноза изменений климата является сравнение ранее опубликованного прогноза с новыми появившимися данными наблюдений. Такая возможность представилась — прогноз до 2025 г., опубликованный в 2008 г. в монографии, в автореферате диссертации и на официальном сайте ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», сравнивался с данными наблюдений, опубликованными на сайте NASA в январе 2016 г. Прогноз составлялся в 2007 г. по данным наблюдений до 2006 г. Предвычисленный по авторской модели тренд замедления потепления полностью оправдался на интервале 2007—2015 гг. Пауза вы-

делена на рис. 2 по современным наблюдениям и на рис.4 по прогнозу, составленному в 2007 г. Кроме того, сравнение погодичных прогностических и фактических значений температуры на интервале 2007-2015 гг. показало совпадение основных пиков anomalно теплых лет 2009—2010 и 2015, а также совпадение условий в менее тёплые 2008, 2011—2013 гг.

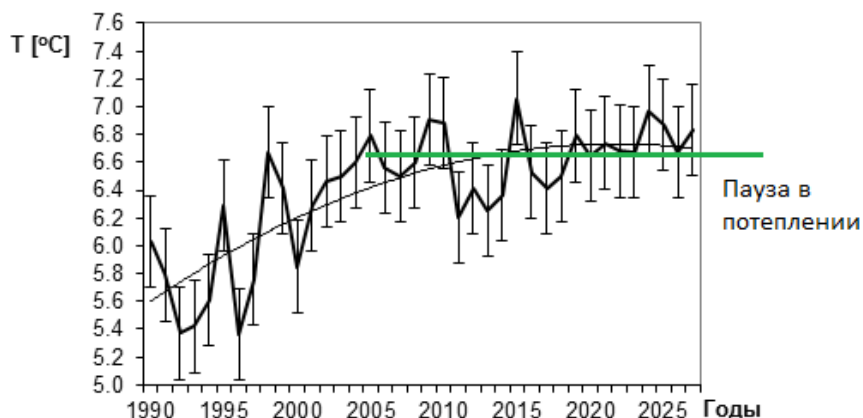


Рисунок 4. Среднегодовая температура воздуха северного полушария по данным наблюдений за 1990—2006 гг. и авторский прогноз на период 2007—2025 гг. (из публикации 2008 г. [8, 13]).

На графике (рис. 5) показаны фактические значения температуры воздуха северного полушария (T_n) по данным NASA за 1961—2015 гг. и опубликованные в 2008 г. прогностические значения температуры воздуха (T_p) на период 2008—2025 гг., полученные по авторской статистической модели.

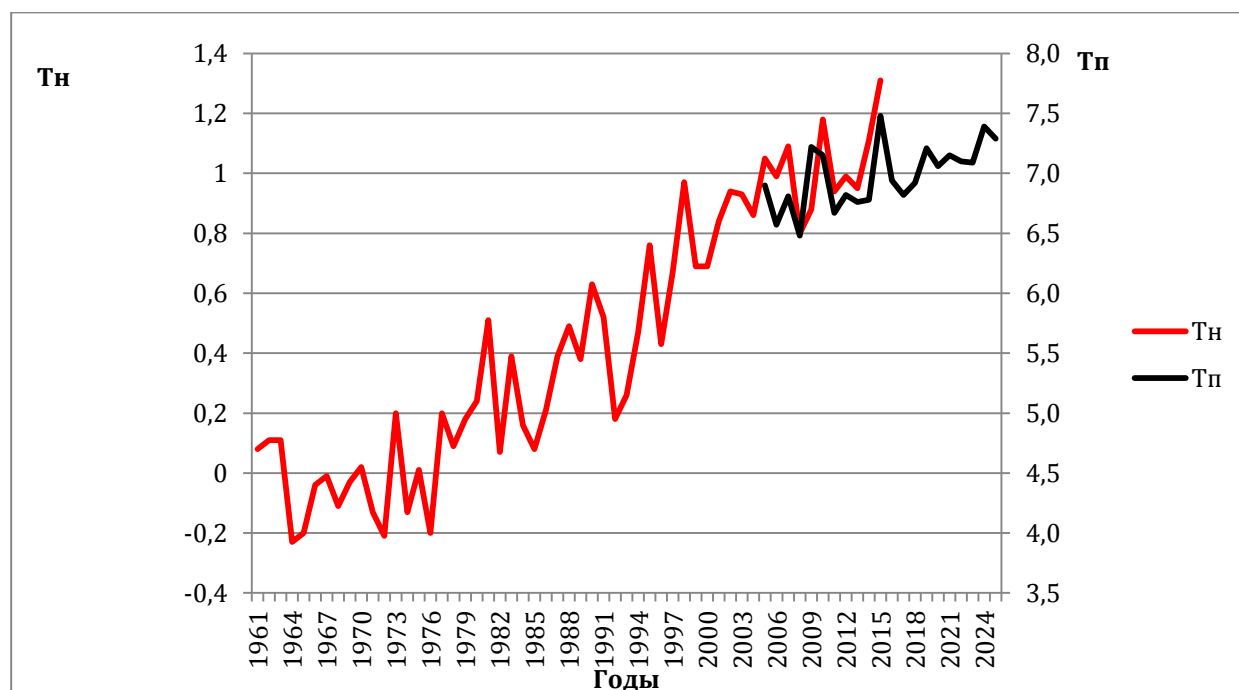


Рисунок 5. Среднегодовая температура воздуха над континентами северного полушария Земли: прогноз из [8, 13], составленный в 2007 г. на 2007—2025 гг. (T_p) и фактические значения температуры воздуха по данным наблюдений на метеорологических станциях северного полушария [16] по 2015 г. (T_n)

Сравнение прогностических значений с фактическими данными показали, что на интервале первого прогностического десятилетия статистическая модель позволила предсказать все основные особенности межгодовых колебаний среднего климата северного полушария и долгосрочного тренда замедления потепления в северном полушарии Земли в начале XXI в. Для сравнения напомним, что лучшие физико-математические модели климата не предсказали замедления потепления в начале XXI в. и совсем не предназначены для прогноза межгодовых колебаний климата. В основе описанной статистической модели лежат новые представления о структуре колебаний регионального климата и данные наблюдений по 8 000 станций северного полушария. Модель позволяет вычислять ожидаемые изменения климата с количественными оценками по каждой метеорологической станции Земли.

Сезонные и месячные метеорологические прогнозы с годовой заблаговременностью

Теоретические предпосылки, изложенные в разделе о прогнозе колебаний климата, оказались пригодными и для более коротких временных масштабов предвычисления температуры воздуха и атмосферных осадков. Успешными оказались сезонные и месячные прогнозы с годовой заблаговременностью.

Несмотря на плавный годовой ход среднесуточной инсоляции, общая циркуляция атмосферы имеет свойства сохранять в течении сезона направления основных воздушных потоков и положение центров действия атмосферы, а затем резко переходить на другой режим, соответствующий следующему сезону. Об этом известном факте также можно условно сказать, что атмосферная циркуляция имеет свойства квантоваться по сезонам. Способность атмосферной циркуляции квантоваться по сезонам хорошо известна, обычно это называют способностью атмосферной циркуляции скачкообразно переходить из режима циркуляции одного сезона в другой режим, характерный для следующего сезона, суть от этого не меняется. Вторым примером квантования может быть циркуляционная эпоха — это наиболее крупная стадия процесса развития атмосферной циркуляции с определенным характером межгодового и внутригодового макропреобразования циркуляции, формирования и распределения термобарических полей на полушарии.

Долгое время сезонные прогнозы основывались на анализе преемственности типов атмосферной циркуляции от сезона к сезону. А.И. Аскания [16] в 1936 г. писал: «Можно ли считать, что приблизительно одинаковые условия гидро-, лито- и атмосферы в одном сезоне приведут приблизительно к одинаковым условиям следующего сезона, или же, наоборот, ... близкие исходные состояния могут ... привести к совершенно разным синоптическим ситуациям. Если верно первое предположение, то рано или поздно проблема долгосрочного про-

гноза будет решена. Если верно второе, то нужно иметь мужество сказать открыто, что проблема долгосрочной синоптики является, по крайней мере, в нашу эпоху, неразрешимой». До недавнего времени подобная философия прогностических связей сохранялась. Теперь понятно, что подобные рассуждения не совсем верны.

Одной из причин недостаточного качества долгосрочных прогнозов, возможно, является не учёт квантования свойств атмосферной циркуляции по сезонам, по пространству и ритмически по годам. Несмотря на то, что внутри года межсезонные связи очень слабые, при прогнозе на месяц особое значение придавалось данным за последний месяц или декаду. Прогноз средней температуры воздуха на предстоящий месяц обычно базировался на экстраполяции развития атмосферных процессов, непосредственно предшествующих прогнозу. По сути, к методам долгосрочных прогнозов применялись удачные подходы, перенесённые из опыта создания краткосрочных и среднесрочных прогнозов. Но заблаговременность прогнозов с таким подходом оказалась ограниченной одним месяцем.

Погодные условия в регионе определяются в значительной мере типом пришедшей воздушной массы. Очагами формирования тропического воздуха служат зоны пассатов северного и южного полушарий, ограниченные поясами субтропических антициклонов обоих полушарий. Полярный воздух северного полушария формируется в арктических и субарктических районах, а полярный воздух южного полушария формируется в антарктических и субантарктических районах. Воздух умеренных широт занимает пространство между зонами полярного и тропического воздуха. Воздушные массы отличаются не только значениями метеорологических элементов, но и факторами, их формирующими, с разным набором циклических составляющих и с различными статистическими и прогностическими свойствами.

Сезонные различия в атмосферной циркуляции умеренных и высоких широт создают своеобразный частотный фильтр колебаний. Фильтр выделяет колебания в зависимости от близости периода к значению кратному длительности одного года. Колебания, период которых выражается целым числом лет, имеют преимущества по сравнению с периодами других значений. Колебания с периодами не кратными году трансформируются в более долгопериодные возмущения. Внешние воздействия на атмосферу с периодами T_1 не кратными году, могут проявляться во внетропических широтах с периодами T в n раз длиннее исходных тропических возмущений: $T = nT_1$, где nT_1 — целое число лет при минимальном целом числе n .

Итак, на основе известных сезонных свойств атмосферы очевидно, что долгопериодные внешние воздействия на атмосферу могут приводить к отнотипным погодным изменениям внетропических широт только в одноименных сезонах, при одинаковых сезонных

условиях атмосферной циркуляции. Внешнее циклическое воздействие на внетропическую атмосферу возможно только на определенных частотах кратных одному году или через интервал времени nT . Это означает, что воздействие с периодом, например, 2 года будет проявляться в атмосфере через 2 года, воздействие с периодом 2,5 года будет проявляться в атмосфере аналогичного сезона только через 5 лет, а воздействие с периодом 2,2 года — через 11 лет и т.д. Наличие своеобразного частотного фильтра приводит к тому, что в атмосфере не обнаруживаются колебания с частотами вынуждающих колебаний, но возникают ритмы с интервалами, в несколько раз превышающими периоды вынуждающих колебаний. Например, если бы в глубинах океана существовал цикл с периодом 18 месяцев, то во внетропической атмосфере он бы проявлялся не каждые 18 месяцев, а только через 3 года (36 месяцев), аналогично, циклическое воздействие с периодом 20 месяцев — проявлялось бы только через 5 лет (60 месяцев), и т.д. С учётом своеобразного сезонного фильтра нельзя ожидать, что приблизительно одинаковые условия гидро-, лито- и атмосферы в одном сезоне приведут приблизительно к одинаковым условиям следующего сезона. Но можно искать закономерности возникновения ритмов, кратных одному году, и череду возмущений в атмосфере, следующих за каждым ритмом. Кратность циклов длительности года автоматически дает заблаговременность прогноза, начиная от одного года. Такой подход использовался в авторском методе сезонных и месячных прогнозов температуры и осадков с годовой заблаговременностью.

Для проверки качества прогнозов аномалий температуры воздуха с учётом её знака и величины применялся способ, опубликованный в [17], по методике руководящего документа². Согласно [17], качество прогноза принимается удовлетворительным, если его ошибка меньше, чем у климатологического прогноза. Прогноз может оказаться удовлетворительным только по знаку аномалий, удовлетворительным только по величине отклонения от фактического значения или удовлетворительным по двум из указанных показателей. В последнем случае качество прогноза принимается хорошим. Если ни одно из условий сравнения с климатологическим прогнозом не выполняется, то прогноз принимается плохим.

Суть оценки «по величине» заключается в том, что удовлетворительными считаются прогнозы, среднеквадратическая ошибка которых меньше естественной изменчивости ряда. Т.е. удовлетворительный прогноз позволяет уменьшить неопределённость наших знаний о предстоящем значении метеорологической величины. Расчёты оценок качества прогнозов

² Методические указания. Руководящий документ. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. РД 52.27.284-91. // Комитет гидрометеорологии при кабинете министров СССР. М., 1991. 149 с.

проводились по авторским прогнозам для 400 станций России за 10 лет. Получено по 400 оценок по каждому месяцу, каждому сезону и году. На основе этих оценок было подсчитано количество станций в % с различным качеством прогнозов аномалий температуры в трёх вариантах: а) совпадение фактической и прогностической аномалии по знаку и величине; б) совпадение по знаку; в) совпадение по величине. Во всех вариантах за 100% принимается общее число станций, равное 400. Сумма оценок трёх вариантов за месяц может превышать 100%, так как оценки по вариантам вычисляются независимо. Количество станций, на которых были «хорошие» и «удовлетворительные» прогнозы, показано в таб. 1 и 2.

Таблица 1

Число станций (%) с «хорошими» и «удовлетворительными» прогнозами аномалии среднемесячной температуры воздуха

Показатель соответствия	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее
а) По знаку и величине	55,7	45,3	28,8	11,4	19,6	22,5	29,8	22,8	34,2	25,3	31,0	5,7	27,7
б) По знаку	76,3	72,5	66,8	59,5	58,9	55,7	80,1	72,5	73,7	71,2	57,9	30,7	64,6
в) По величине	71,8	63,6	44,6	27,2	25,0	30,7	36,1	28,8	39,9	33,9	42,4	25,0	39,1

Таблица 2

Оправдываемость (%) прогнозов по знаку и величине аномалии среднесезонной и среднегодовой температуры воздуха

Показатель соответствия	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
а) По знаку и величине	96,2	66,1	74,1	67,4	90,2
б) По знаку	96,5	73,4	86,7	72,2	90,2
в) По величине	98,7	90,5	86,1	84,5	97,0

Оценки, детализированные по месяцам (таб. 1), показывают, что оправдываемость прогнозов месячной температуры всегда лучше по знаку, чем по величине. Метод прогноза обладает сглаживающими свойствами, при этом знак аномалии часто прогнозируется правильно, а величина аномалии занижена. Лучшее качество прогнозов наблюдается в январе — 76,3% станций с прогнозами удовлетворительными по знаку и 71,8% — по величине, а также в июле — удовлетворительные прогнозы по знаку были на 81,1% станциях. Прогнозы удовлетворительные по знаку на более чем 70% станциях наблюдаются в январе — феврале и в июле — октябре. В другие месяцы станций с удовлетворительными прогнозами было меньше.

По обобщённым по всем месяцам оценкам оказалось, что в среднем по России на 24,0% станциях прогнозы среднемесячной температуры были плохими, на 64,6% станциях оценки показали удовлетворительные прогнозы по знаку аномалий среднемесячных значений, на 39,1% станциях наблюдались удовлетворительные прогнозы по величине аномалии, а на 27,7% станций оценки прогнозов были хорошими и по знаку и по величине.

Прогнозы среднесезонных и среднегодовых значений были более точны (таб. 2). Такие прогнозы были удовлетворительными по знаку или по величине аномалии более чем на 70% станций. Лучшее качество прогнозов было зимой (свыше 90% станций с хорошими прогнозами) и летом (свыше 80% станций с хорошими прогнозами). Весной и осенью около 70% станций с удовлетворительными прогнозами по знаку и 84-90% станций с удовлетворительными прогнозами по величине. При прогнозе среднесезонных значений негативные сглаживающие свойства метода не проявляются, так как ряды фактических среднесезонных значений температуры более гладкие и, видимо, легче поддаются статистическому моделированию. Станций с хорошими сезонными прогнозами по знаку и величине зимой было около 96%, летом 74%, а весной и осенью около 66%. Среднегодовые значения прогнозируются хорошо на 90% станций (таб. 2).

Цена прогноза изменения климата Арктики

Значительные изменения характеристик ледового покрова в Арктике [18, с. 814—818; 19, с. 59—65] открывают новые экономические перспективы для освоения богатых природными ресурсами арктического шельфа и для морской перевозки грузов вдоль арктического побережья России. Жизнь и деятельность человека в Арктике в значительной мере осложняется суровыми климатическими условиями. Транспортировка жизнеобеспечивающих грузов в Арктике возможна только по открытой воде во время периодов низкой ледяной концентрации по северным морям вдали от многолетнего льда. Сезонный морской ледяной цикл затрагивает человеческую деятельность и среду обитания биологических видов. В последние годы площадь морского льда сокращалась [13; 14]. Таяние льда в Северном Ледовитом океане летом дает доступ к ископаемым источникам энергии в зоне шельфа. Это способствует освоению Арктики.

Современные планы освоения Арктики и технологии добычи минеральных ресурсов построены в предположении ожидаемого продолжения потепления климата. Но в части прогноза климата существует большая неопределённость. В случае похолодания климата понадобятся новые технологии подлёдной разработки месторождений.

В настоящее время для освоения севера необходима новая транспортная система. Уже планируется создать на севере Сибири транспортную систему с выходом на Северный морской путь. Главный недостаток Северного морского пути — навигация там возможна 2-4 месяца в году в условиях современного аномально тёплого климата. В случае похолодания климата Северный морской путь будет потерян.

Уже сегодня в освоение Арктики вкладываются огромные средства. В надежде на сохранение тёплого климата на Ямале начали строить порт Сабетта. К порту Сабетта запланировано построить 700-километровую железнодорожную магистраль с юга. Рассматриваются планы строительства нового опорного арктического порта на побережье Баренцева моря в районе бухты Индига. В Арктике предполагается построить завод по сжижению природного газа, терминалы для крупнотоннажных танкеров, нефтеналивные терминалы, создать базу для мелкого ремонта флота.

Очень важно знать, будут ли климатические условия будущего соответствовать сегодняшним технологиям добычи и транспортировки минеральных ресурсов на севере. Будущее севера в значительной мере зависит от будущего климата.

Заключение

Суровый климат высоких широт является лимитирующим фактором освоения севера. Современное потепление оказалось благоприятным для развития добычи минеральных ресурсов на шельфе северных морей и для использования Северного морского пути в качестве основной транспортной магистрали вдоль всей северной части Евразии.

На основе данных наблюдений за климатической системой и многолетних исследований колебаний характеристик климатической системы, а также внешних возмущающих факторов, описаны новые представления о структуре колебаний и о закономерностях появления ритмов в характеристиках атмосферы, которые дали возможность на новых принципах построить статистическую модель колебаний температуры воздуха. Статистическая модель позволяет получать прогностические оценки изменений климата на два ближайших десятилетия. Прогнозируются региональные значения температуры по пунктам наблюдений, по малым и большим регионам. Модель универсальна и может быть применена для любого региона и для разных характеристик климатической системы.

Модель проходит авторское испытание, начиная с 2007 г. Наблюдаемая с начала XXI в. пауза в глобальном потеплении была заблаговременно предсказана моделью ещё до обнаружения этой паузы (в 2008 г. был опубликован прогноз на каждый год до 2025 г. средней годовой температуры воздуха в северном полушарии).

Межгодовые колебания аномалий климата, предсказанные в 2008 г., совпали по знаку с погодичными значениями аномалий температуры последующих наблюдений по 2015 г. Были предсказаны аномально тёплые 2009—2010 и 2015 гг. (выше трендовых значений), а также менее теплые 2008, 2011—2013 г. (ниже трендовых значений).

С учётом сезонных особенностей трансформации ритмов разработана прогностическая модель для сезонных и месячных прогнозов температуры воздуха и количества атмосферных осадков с годовой заблаговременностью. Оценки качества прогнозов, выполненные на независимом материале, показали их информативность.

Литература

1. Книпович Н. М. О термических условиях Баренцева моря в конце мая 1921 г. // Бюллетень Российского гидрологического института. 1921, № 9, с.10—12.
2. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
3. Кононова Н.К. Особенности циркуляции атмосферы северного полушария в конце XX — начале XXI века и их отражение в климате // Сложные системы. 2014. № 2 (11). С. 11—35.
4. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. О разнонаправленности изменений глобального климата на материках и океанах // Доклады АН. 2005. Т. 400, № 1. С. 98—104.
5. Нигматулин Р.И. Заметки о глобальном климате и океанских течениях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 1—8.
6. Котляков В.М. Глобальные изменения климата: антропогенное влияние или естественные вариации? // Экология и жизнь. 2001. N 1. С. 44—47.
7. Шерстюков Б.Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Изд. ГУ ВНИИГМИ-МЦД, 2008, 246 с. URL: http://meteo.ru/publish_tr/monogr2/glava7.pdf (дата обращения: 18.03.2016).
8. Абдусаматов Х.И. О долговременных вариациях потока интегральной радиации и возможных изменениях температуры в ядре Солнца // Кинематика и физика небесных тел. 2005, Т. 21. 471 с.
9. Молчанов А.М. Гипотеза резонансной структуры Солнечной системы // Пространство и время. 2013. 1(11). С. 34—48.
10. Шерстюков Б.Г. Долгосрочный прогноз месячной и сезонной температуры воздуха с учётом периодической нестационарности // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 14—26.
11. Жуковский Е.Е., Киселева Т.Л., Мандельштам С.М. Статистический анализ случайных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1976, 406 с.
12. Шерстюков Б. Г. Пространственные и сезонные особенности изменений климата в период интенсивного глобального потепления. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. Казань. 2008. URL: <http://oldvak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/vak/announcements/geogr/SherstukovBG.doc> (дата обращения: 18.03.2016).
13. Serreze, Mc; Holland, Mm; Stroeve, J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. Science, Mar 2007. New York. 315 (5818): 1533—6. doi:10.1126/science.1139426.
14. Stroeve, J., M. Serreze, S. Drobot, S. Gearheard, M. Holland, J. Maslanik, and T. Scambos. Arctic sea ice plummets in 2007. //Eos Transaction American Geophysical Union, 2008, 89 (2) С. 13-14.
15. Table Data: Global and Hemispheric Monthly Means and Zonal Annual Means. URL: http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v3/NH.Ts.txt (дата обращения: 18.03.2016).
16. Аскназия А.И. К вопросу о методике долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. 1936. №10.
17. Гирс А.А., Кондратович К.В. Методы долгосрочных прогнозов погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 42 с.
18. Мохов И.И., Хон В.Ч., Рекнер Э.. Изменения ледовитости Арктического бассейна в XXI веке по модельным расчетам: оценка перспектив Северного морского пути. Доклады РАН, 2007, 414, с. 814—818.
19. Хон В.Ч., Мохов И.И., Анализ ледовых условий в арктическом бассейне и перспективы развития северного морского пути в XXI веке. Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 59—65.

References

1. Knipovich H. M. O termicheskikh usloviyah Barentseva morja v konce maja 1921 g. *Bjulleten' Rossijskogo gidrologicheskogo institute*, 1921, № 9, pp. 10—12.
2. IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
3. Kononova N.K. Osobennosti cirkuljacii atmosfery severnogo polusharija v kon-ce HH — nachale XXI veka i ih otrazhenie v climate. *Slozhnye sistemy*, 2014, № 2 (11), pp. 11—35.
4. Byshev V.I., Nejman V.G., Romanov Ju.A. O raznonapravlennosti izmenenij global'nogo klimata na materikah i okeanah. *Doklady AN*, 2005, T. 400, № 1, pp. 98—104.
5. Nigmatulin R.I. Zametki o global'nom klimате i okeanskikh techenijah. *Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2012, T. 48, № 1, pp. 1—8.
6. Kotljakov V.M. Global'nye izmenenija klimata: antropogennoe vlijanie ili estestvennye variacii? *Jekologija i zhizn'*, 2001, N 1, pp. 44—47.
7. Sherstjukov B.G. *Regional'nye i sezonnye zakonomernosti izmenenij sovremennogo klimata*. Izd. GU VNIIGMI-MCD, 2008, 246 p. URL: http://meteo.ru/publish_tr/monogr2/glava7.pdf (Accessed: 18 March, 2016).
8. Abdusamatov H.I. O dolgovremennykh variacijah potoka integral'noj radiacii i vozmozhnykh izmenenijah temperatury v jadre Solnca. *Kinematika i fizika nebesnyh tel*, 2005, T. 21, 471 p.
9. Molchanov A.M. Gipoteza rezonansnoj struktury Solnečnoj sistemy. *Prostranstvo i vremja*, 2013, 1(11), pp. 34—48.
10. Sherstjukov B.G. Dolgosrochnyj prognoz mesjachnoj i sezonnoj temperatury vozduha s uchjotom periodicheskoj nestacionarnosti. *Meteorologija i gidrologija*, 2007, № 9, pp. 14—26.
11. Zhukovskij E.E., Kiseleva T.L., Mandel'shtam C.M. *Statisticheskij analiz sluchajnyh processov*. L.: Gidrometeoizdat, 1976, 406 p.
12. Sherstjukov B. G. *Prostranstvennye i sezonnye osobennosti izmenenij klimata v period intensivnogo global'nogo poteplenija. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora geograficheskikh nauk*. Kazan'. 2008. URL: <http://oldvak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/vak/announcements/geogr/SherstjukovBG.doc> (accessed: 18 March, 2016).
13. Serreze M.; Holland M; Stroeve. J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science*, Mar 2007. New York. 315 (5818): 1533—6. doi:10.1126/science.1139426.
14. Stroeve J., Serreze M., Drobot S., Gearheard S., Holland M., Maslanik J., Scambos T. Arctic sea ice plummets in 2007. *Eos Transaction American Geophysical Union*, 2008, 89 (2) 13—14
15. *Table Data: Global and Hemispheric Monthly Means and Zonal Annual Means*. URL: http://data.giss.nasa.gov/gistemp/tabledata_v3/NH.Ts.txt (accessed: 18 March, 2016).
16. Asknazija A.I. K voprosu o metodike dolgosrochnykh prognozov pogody. *Meteorologija i gidrologija*, 1936, №10.
17. Girs A.A., Kondratovich K.V. *Metody dolgosrochnykh prognozov pogody*. L.: Gidrometeoizdat, 1978, 42 p.
18. Mohov I.I., Hon V. Ch, Rekner E. Izmenenija ledovitosti Arkticheskogo bassejna v XXI veke po model'nym raschetam: ocenka perspektiv Severnogo morskogo puti. *Doklady RAN*, 2007, 414, p. 814—818.
19. Hon V.Ch., Mohov I.I., Analiz ledovykh uslovij v arkticheskom bassejne i per-spektivy razvitija severnogo morskogo puti v XXI veke. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2008, № 1 (78), pp. 59—65.