

# Глобальное потепление и аномальная погода начала XXI века

В.А.Семенов

Первое десятилетие XX в. стало самым теплым за время инструментальных наблюдений за глобальной приповерхностной температурой на земном шаре. Ее значения получают, анализируя множество температурных рядов, собранных на метеорологических станциях на суше, а также измеряя температуру поверхности океана (различными методами — с морских судов, автоматических буев, в последние десятилетия — со спутников). Такие данные позволяют составить достоверную картину крупномасштабных температурных аномалий за последние 150 лет.

С начала XX в. глобальная температура выросла примерно на 1°C. Но это увеличение не было равномерным. За так называемым потеплением начала века, достигшим максимума в 40-х годах, последовало некоторое похолодание, вновь сменившееся положительным температурным трендом с 70-х. Потепление ускорилось, и за последние 30 лет XX в. температура выросла почти на 0.7°C. В целом аналогично менялась температура Северного полушария (рис.1) [1], на которое приходится примерно 2/3 площади суши и 90% населения планеты.

По результатам анализов годовичных колец деревьев, корал-



**Владимир Анатольевич Семенов**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории теории климата Института физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН. Область основных научных интересов — численное моделирование климатических изменений, экстремальные погодные явления, климат Арктики.

лов, характеристик донных отложений, ледяных кернов реконструируются аномалии температуры Северного полушария за последнее тысячелетие. Эти реконструкции (которые, тем не менее, часто становятся предметом горячих споров) показали, что температура последнего десятилетия беспрецедентно высока даже в тысячелетнем масштабе. Я намеренно не касаюсь причин глобального потепления, а также замедления темпов роста температуры в течение последнего десятилетия. Это требует отдельного обсуждения и никак не влияет на тот неоспоримый факт, что начало XXI в. характеризуется самыми высокими глобальными и среднеполушарными температурами за последние как минимум 150 лет. А самый быстрый рост глобальной температуры наблюдался в последние 30 лет XX в.

Казалось бы, повышение глобальной температуры на 1°C — это очень небольшое изменение. Но здесь важно знать следующее. Во-первых, потепление происходит быстрее (примерно вдвое) в высоких широтах Северного полушария. Это явление получило название арктического усиления. Во-вторых, при глобальном потеплении температура над сушей растет быстрее, чем над океаном (приблизительно на 40%). Так, над густонаселенными континентами Северного полушария в средних широтах рост среднегодовой температуры составляет уже не 1°C, а 2—2.5°C. Обе эти особенности главным образом связаны с ростом содержания водяного пара в атмосфере при увеличении температуры (около 7% на 1°C). Водяной пар,

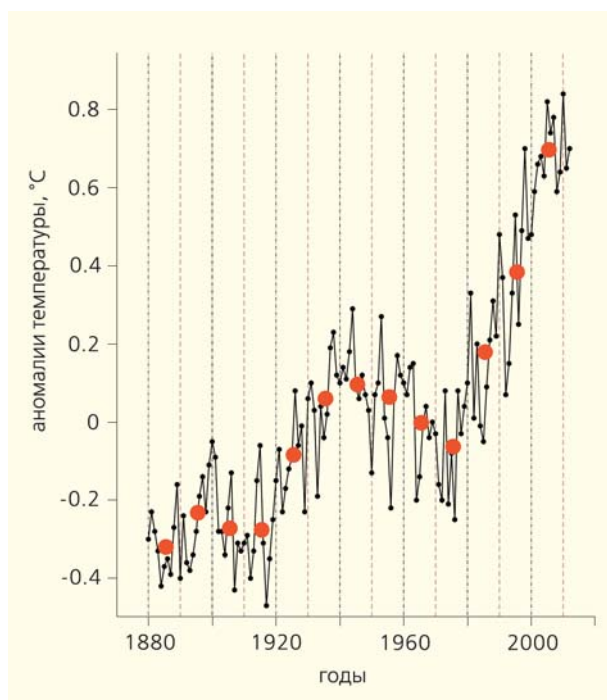


Рис.1. Аномалии среднегодовой (черные кружки) приповерхностной температуры Северного полушария [1]. Большие красные кружки представляют температурные аномалии, осредненные за десятилетия: 1881—1890, 1891—1900...2001—2010 гг.

основным источником которого служит испарение с поверхности океана, переносится из низких широт в высокие и с океана на сушу, где, конденсируясь, приводит к дополнительному потеплению. В-третьих — и это, возможно, самое главное, — даже небольшие вариации глобальной температуры приводят к значительным изменениям циркуляции атмосферы и океана, ответственной за перенос тепла из низких широт в высокие. Механизмы таких изменений, как правило, сложны; в настоящее время они стали предметом многочисленных исследований.

Заметнее, чем температура, изменяются другие характеристики земной климатической системы. Например, за последние 30 лет площадь льда летом в Арктике уменьшилась более чем в два раза. В случае потепления еще на 1°C акватория Северного Ледовитого океана в теплый период года, как ожидается, будет совсем освобождаться ото льда. Тем не менее, даже учитывая эти особенности, региональное увеличение средней (за год или за сезон) температуры воздуха на 0.2—0.5°C в десятилетие выглядит гомеопатической дозой.

Человек и созданная им инфраструктура гораздо более чувствительны к экстремальным погодным явлениям, чем к изменениям средних климатических параметров. Экстремальные явления часто сопровождаются большим экономическим ущербом, негативными последствиями для экологии,

а порой и многочисленными человеческими жертвами. Связанные, как правило, с динамикой атмосферной циркуляции — циклонами, антициклонами, атмосферными фронтами — погодные аномалии зависят, причем часто нелинейным образом, от множества факторов. Приводит ли глобальное потепление к увеличению вероятности и интенсивности экстремальных погодных явлений? И если приводит, то каков механизм, связывающий глобальные изменения климата и капризы погоды в региональном масштабе? Однозначных ответов на эти вопросы пока еще нет, хотя в некоторых случаях есть основания говорить о возможном увеличении экстремальности погоды из-за потепления. Также интересно и важно, что связь между аномальной погодой и глобальными климатическими изменениями может быть весьма непростой. В данной статье я постараюсь, помимо рассмотрения некоторых общих аспектов, на нескольких примерах проиллюстрировать сложность физических процессов, которые могут приводить к аномалиям погоды на территории России. Следует отметить, что интенсивные исследования в области экстремальных явлений начались лишь 10—15 лет назад. Этому способствовали систематизация глобальных данных наблюдений и развитие климатических моделей. Дополнительной мотивацией к проведению таких исследований в последние годы стал значительный рост числа сообщений о погодных аномалиях.

Действительно, наряду с рекордными значениями глобальной температуры начало XXI в. сопровождалось множеством экстремальных погодных явлений в различных регионах планеты. Многие из этих событий по своей интенсивности стали беспрецедентными за последние несколько столетий. В качестве примеров (они широко освещались в СМИ) можно упомянуть экстремальные осадки над территорией Германии и Чехии в 2002 г., вызвавшие сильные наводнения в Праге и Дрездене (по уровню воды их уже превзошли наводнения мая-июня 2013 г.). Летом 2003 г. температура воздуха в Западной Европе стала рекордно высокой за как минимум 500 предшествующих лет. В 2005 г. над Северной Атлантикой зародилось множество тропических ураганов, в их числе «Катрина», которая привела к катастрофическим событиям в Новом Орлеане. Спустя два года над Западной Европой пронесся разрушительный шторм «Кирилл». В 2009 г. жара и засуха случились в Австралии, в 2011 г. — в Северной Америке. Жителям Центральной России надолго запомнилась летняя жара 2010 г. с сильной засухой и пожарами, также не имеющая аналогов за последние 500 лет [2]. Еще одна интересная особенность последнего десятилетия — ряд аномально холодных зим на севере Евразии, в том числе на европейской территории России. Эти события вызвали волну обсуждений из-за кажущегося противоречия (как будет показано — мнимого) с кон-

цепцией глобального потепления, предсказывающей наибольшее потепление как раз над северными континентами и в зимний период.

Следует разграничивать экстремальные и аномальные события. Замечу, что точного и универсального определения экстремального события в климатологии пока нет. Приведенное ниже — результат консенсуса, к которому удалось прийти широкому кругу специалистов. Оно, с их точки зрения, позволяет наиболее удачно описать широкий спектр различных явлений, считающихся экстремальными [3]. Экстремальное событие — это событие, при котором величина некоторой характеристики климата (или погоды) находится выше (или ниже) определенного порога, лежащего на верхнем (или нижнем) краю диапазона изменений этой характеристики. Когда рассматривается климатическое экстремальное событие, подразумевается, что диапазон изменений данной характеристики включает достаточно большой (как правило, весь доступный) период наблюдений. Согласно такому определению, летняя жара 2010 г. считается экстремальной, поскольку температура превысила все предшествующие средние для летних месяцев максимальные значения (рис.2). Аномальное же явление характеризуется значительным отклонением климатической переменной от среднего значения — нормы, вычисляемой для интересующего нас периода времени. Хорошим примером были холодные зимы XXI в., которые стали аномально холодными на фоне теплых зим предшествующих двух десятилетий (см. рис.2), но при этом обычными, скажем, для периода 1950—1970-х годов.

Некоторые изменения в частоте и интенсивности экстремальных явлений — прямое следствие общего роста температуры. Они ожидаемы

и объяснимы с помощью простых физических и статистических законов и, кроме того, достаточно хорошо воспроизводятся климатическими моделями. Это, например, экстремально высокие ежедневные температуры и их повторяемость. Они растут с потеплением, что вполне ожидаемо при общем сдвиге функции плотности распределения вероятности температурных аномалий. Такие тенденции отмечаются и по данным наблюдений, и по результатам экспериментов с климатическими моделями. Уменьшаются в целом вероятность и величина отрицательных экстремальных температур.

Несколько сложнее и неопределеннее ситуация с ежедневными осадками. Но и здесь есть физическое обоснование и определенное согласие между данными наблюдений и модельными результатами. Как уже упоминалось, при увеличении температуры воздуха растет содержание влаги в атмосфере. Значит, с потеплением следует ожидать более интенсивных дождей. Так в целом и происходит: интенсивность осадков и их экстремальность растут. Во многих регионах все большая часть общего количества осадков за месяц или сезон приходится именно на сильные дожди, при этом вклад слабых уменьшается. Кроме того, увеличение температуры поверхности океана ведет к росту испарения, а оно, в свою очередь, — к повышению среднего количества осадков. Но пространственная структура таких изменений бывает очень сложной. Например, может снижаться общее количество осадков и расти их экстремальность — из-за уменьшения числа дней с осадками (что, в частности, и происходит в субтропических широтах Евразии) [4]. Еще более сложным образом может меняться статистика сухих и влажных периодов [5].

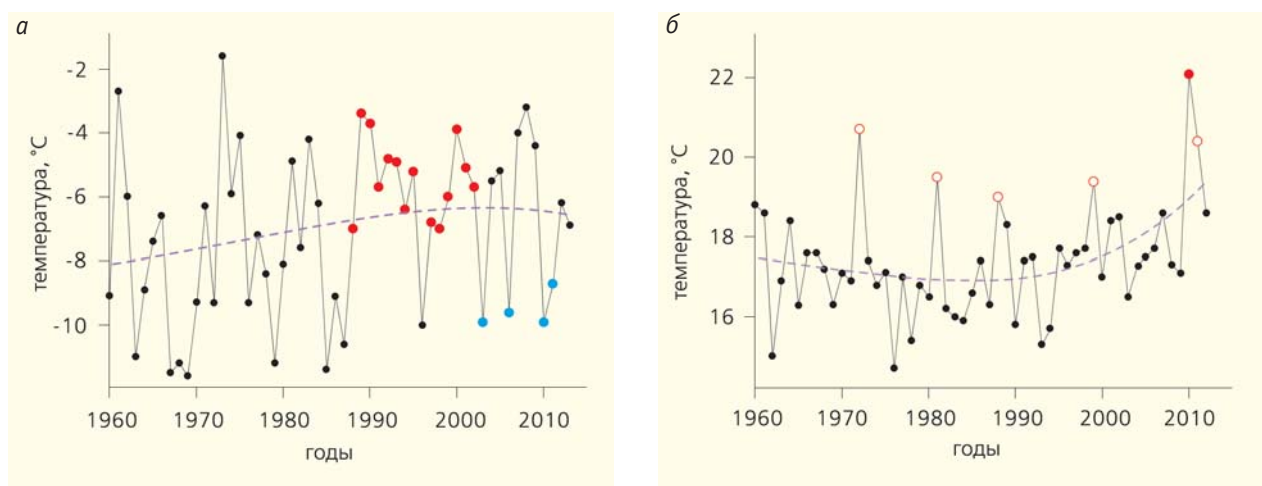


Рис.2. Средние для декабря—февраля (а) и июня—августа (б) температуры в Москве. Красные кружки для зимних температур отмечают период теплых зим 1988—2003 гг., синие — аномально холодные зимы XXI в. Полые красные кружки для летних температур показывают жаркие годы, залитый красный кружок — 2010 г. Прерывистой линией обозначен климатический тренд, представленный полиномом 5-й степени.

Непроста и реакция атмосферной циркуляции на глобальное потепление. В самых общих чертах: уменьшение перепада температур между экватором и полюсом, происходящее при потеплении, должно приводить к снижению интенсивности атмосферных движений. С другой стороны, повышенное содержание влаги в воздухе — скрытой энергии, приводящей к нагреву при выпадении осадков, — может усилить циркуляцию. Еще в начале 1990-х годов, на заре повышенного интереса к проблеме глобального потепления, исследования в нашем институте показали, что потепление может сопровождаться увеличением вероятности формирования долгоживущих погодных аномалий, в том числе блокирующих антициклонов в средних широтах Северного полушария [6, 7]. Это происходит из-за уменьшения здесь скорости зонального потока, которое наблюдается в последние десятилетия. Аналогичные выводы были сделаны и при анализе данных глобальных климатических моделей [8].

Тенденции изменений региональных аномальных погодных режимов, однако, характеризуются большим разнообразием и неопределенностью. Чтобы читатель мог представить себе сложность климатических процессов, вызывающих погодные аномалии, и их связь с глобальным потеплением, я подробно остановлюсь на двух уже упомянутых примерах: холодных зимах последних лет и жаре 2010 г.

### Холодные зимы XXI в.

Ряд аномально холодных зим начался с 2003 г. В этот год средняя для зимы температура в Москве была примерно на 3°C ниже нормы и на 5—7°C ниже, чем для большинства зим предшествующего теплого периода 1988—2002 гг. (см. рис.2). Аномалия 2003 г. была воспринята как случайное погодное явление и не вызвала особого интереса у климатологов. Глобальная температура продолжала бить рекорды, арктический лед стремительно таял, и ожидалось, что установившийся в предшествующие 15 лет режим теплых зим продолжится и на этот раз (как он продолжился после аномально холодной зимы 1996 г.). Однако уже через два года (в 2006 г.) зима опять выдалась особенно холодной. Встал вопрос о том, случайны ли подобные события и каковы их механизмы на фоне продолжающегося потепления (которое, согласно модельным оценкам, должно быть наиболее сильным в высоких широтах Северного полушария). Зимой 2006 г. среднемесячные аномалии приповерхностной температуры воздуха достигали -4°C в Европе и -10°C в Центральной Сибири [9]. Эта зима во многих европейских странах стала самой холодной за последние три десятилетия. Аномальные холода и сильные снегопады отмечались также в Восточной Азии. Затем последовали холодные зимы 2010 и 2011 гг. (рис.3). Зимы 2012 и 2013 гг., хоть и не сопровождалась значитель-



Рис.3. Аномально холодный январь 2010 г. Москва, утро.

Фото автора.

ной отрицательной аномалией температуры, но запомнились продолжительными (в несколько недель) сильными морозами в западной части Евразии. Как уже говорилось, такие зимы относятся к аномальным событиям. Действительно, в 1960—1980-х годах сходные по суровости зимы считались обычным явлением. Но с 1988 г. все зимы (кроме 1996 г.) были либо аномально теплыми, либо с температурами, находящимися вблизи средних значений. В целом в современный период, как и в 1960—1987 гг., примерно каждая третья зима была аномально холодной (если провести условный порог, скажем, в  $-8^{\circ}\text{C}$  для среднезимней температуры в Москве), в то время как в период с 1988 по 2002 г. такая аномалия случилась лишь один раз за 15 лет.

Очевидно, что причиной морозов, как правило, становился блокирующий антициклон в Восточной Европе, препятствующий переносу теплых воздушных масс из Атлантики и выхолаживающий атмосферу. Но почему формировался такой антициклон? И почему он чаще всего располагался именно у южных берегов Баренцева моря? На эти вопросы не было ясных и обоснованных ответов. Модели общей циркуляции атмосферы с использованием граничных условий (температуры поверхности океана и границ морского льда), наблюдавшихся зимой 2006 г., не смогли воспроизвести похожую антициклоническую аномалию. Напрашивался вывод о случайном характере исследуемого феномена. Но некоторые особенности холодной зимы 2006 г. и других аналогичных событий указывали, что именно резкое изменение внешних (по отношению к атмосфере) условий — прежде всего сокращение площади морских льдов — могло стать причиной формирования аномальных температурных режимов.

Действительно, если обратить внимание на изменение площади морского льда в Баренцевом и западной части Карского морей (рис.4), можно заметить, что в 2005 г. она резко сократилась. Относительная площадь льда с 50—60%, характерных для зим 1970—1990-х годов, уменьшилась до современных 40% и менее. Есть еще одна интересная деталь в структуре температурных аномалий: за последнее десятилетие в периоды сильных морозов похолодание над Евразией сопровождалось контрастирующим потеплением (с разницей температур  $\sim 15^{\circ}\text{C}$ ) как раз в регионе Баренцева моря (рис.5). Пример тому — антициклоническая аномалия, расположившаяся к югу от Баренцева моря и ставшая причиной морозов на территории России. Важно отметить, что такое распределение аномалий температур и атмосферного давления было характерно и для других холодных зим современного периода.

При сокращении площади льда растет поток тепла — как явного, так и скрытого (испарение) — с открытой водной поверхности в атмосферу. Из-

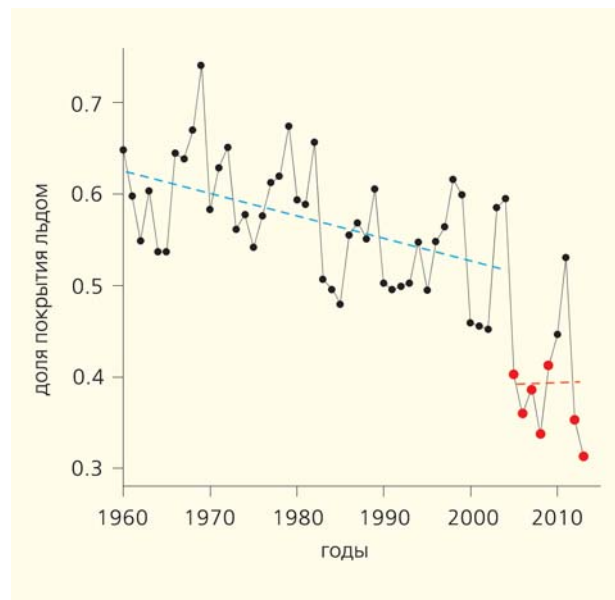


Рис.4. Площадь ледового покрова Баренцева и западной части Карского морей в зимний период по данным наблюдений. Красные кружки — аномально низкие значения с 2005 г. Прерывистая синяя линия — линейный тренд в период 1960—2004 гг., красная — в период 2005—2012 гг.

мерения показывают, что такой поток в течение зимних месяцев может достигать  $1000 \text{ Вт/м}^2$  (представьте себе кипящий электрический чайник на каждом квадратном метре поверхности моря)! Следовательно, смена ледового режима в начале XXI в. должна сопровождаться нагревом нижних слоев атмосферы и изменением ее региональной циркуляции.

Почему же тогда эксперименты с атмосферными моделями не смогли воспроизвести характерные условия холодных зим — контраст температурных аномалий между западной частью Евразии и Баренцевым морем и антициклон над его южным побережьем? Возможно, потому, что даже при реалистичном задании границ морского льда потоки тепла, рассчитанные моделью, будут отличаться от наблюдавшихся. Ведь модели, как правило, воспроизводят средние значения параметров атмосферной циркуляции с систематическими ошибками. Поэтому возникла идея изменять площадь покрытия льда в Баренцевом море в модели атмосферы постепенно, проходя весь диапазон возможных состояний, от 100% (полного покрытия льдом) до 0% (свободной поверхности моря). Тогда даже при наличии ошибок в модели (при условии, что они не очень велики) можно оказаться в нужном режиме теплового воздействия на атмосферу. Такие эксперименты были выполнены, и их анализ привел к очень интересным результатам [9].

Оказалось, что реакция атмосферной циркуляции на увеличение потоков тепла с поверхнос-

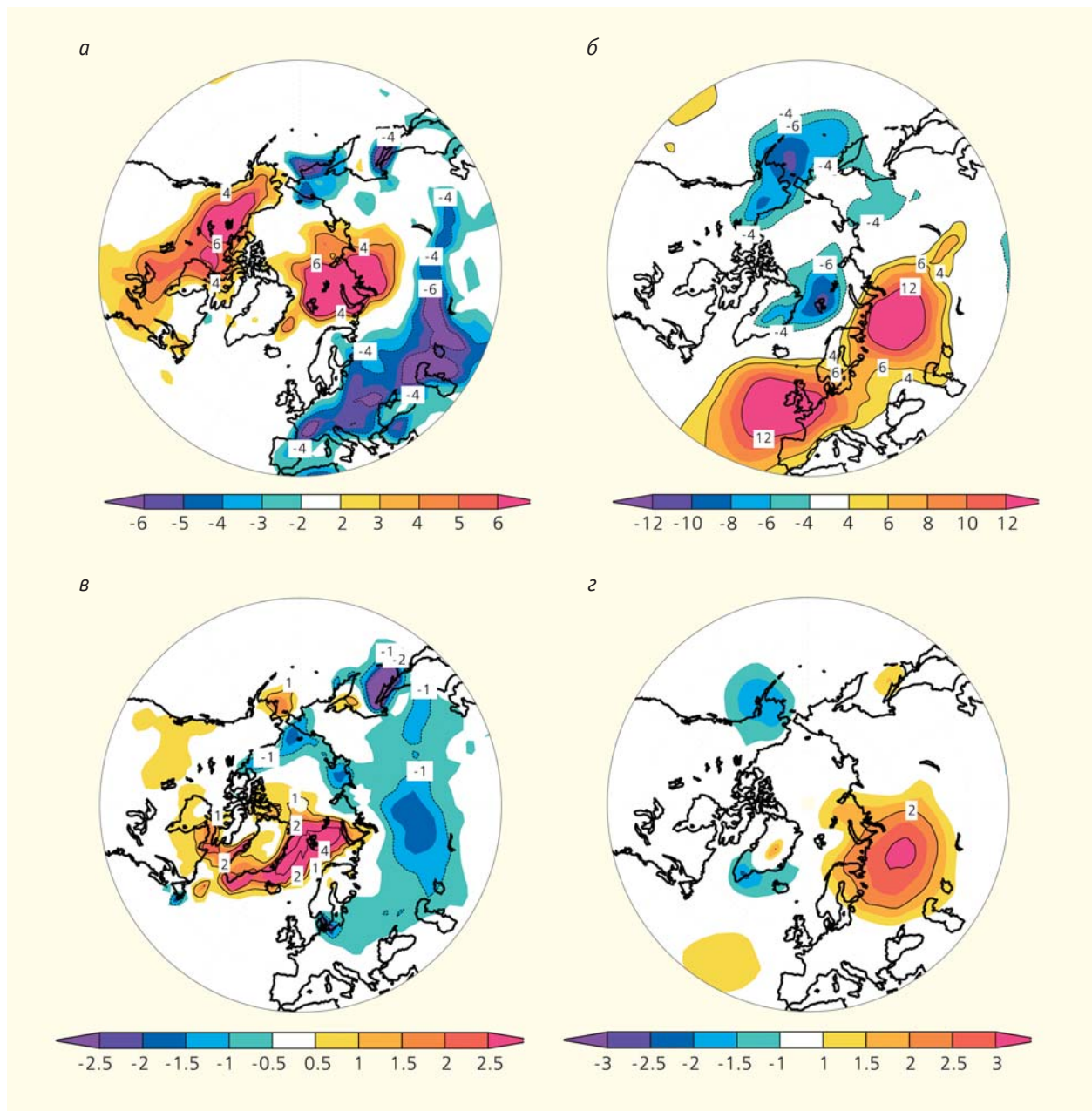


Рис.5. Аномалии: *а, в* — приземной температуры (°C); *б, з* — атмосферного давления (гПа); *а, б* — наблюдавшиеся в феврале 2012 г. (по данным реанализа NCEP/NCAR [9]); *в, з* — полученные в численных экспериментах с моделью общей циркуляции атмосферы при заданной отрицательной аномалии арктического ледяного покрова.

ти Баренцева моря — нелинейная (рис.6). Возможно, именно поэтому многие попытки воспроизвести в модельных экспериментах антициклон, наблюдавшийся во время холодных зим, оказывались неудачными. Климатический режим в моделях просто не попадал в нужный достаточно узкий диапазон изменений интенсивности нагрева, необходимый для формирования региональной антициклонической аномалии в потоке циркуляции. Монотонное уменьшение площади морских льдов сначала приводит к потеплению над об-

ширной областью северной части Евразии, а затем (при сокращении площади льда от 80—60% до 40%) — к относительному похолоданию, которое вновь сменяется потеплением при полном исчезновении морского льда. Такая динамика связана с аномалиями региональной атмосферной циркуляции над Баренцевым морем (см. рис.6). В самом начале сокращения ледового покрова возникает отрицательная (циклоническая) аномалия давления воздуха, а при переходе от 60 к 40% площади покрытия моря льдом давление

растет и формируется антициклон. Он располагается над морем или южнее (см. рис.5) и вызывает похолодание на севере Евразии. Механизм такого отклика региональной циркуляции связан с нелинейным взаимодействием конвекции, поверхностного трения и термического ветра в приграничном слое атмосферы с источником тепла на нижней границе [9].

В реальности площадь ледового покрова (см. рис.4) в начале XXI в. сократилась как раз до ~40%, что в модельных экспериментах сопровождается появлением антициклонической аномалии и относительным понижением температуры. Оно, впрочем, относительно небольшое (примерно 1°C), но при этом вероятность очень сильных отрицательных температурных аномалий (до -7°C) существенно возросла (более чем в три раза).

Описанные выше эксперименты были идеализированными, поскольку аномалии площади льда задавались путем равномерного изменения его концентрации во всех модельных ячейках, покрывающих регион Баренцева моря. А модели атмосферы с реалистичными аномалиями ледяного покрова, как уже отмечалось, не воспроизводили эффект похолодания. В нашем институте мы вместе с коллегами из Института морских исследований в Киле (Германия) продолжили работу в этом направлении и все-таки смогли воспроизвести такой эффект в одном из экспериментов с уменьшением площади льда согласно данным наблюдений [11, 12]. Модельные аномалии давления и температуры стали следствием уменьшения площади ледяного покрова (главным образом в Баренцевом море), заданного по результатам реальных наблюдений (см. рис.5). Это и антициклоническая аномалия к югу от Баренцева моря, и обширное похолодание на территории Евразии. Нелинейная зависимость вероятности наступления холодных зим от площади льда была также обнаружена и в экспериментах с глобальными климатическими моделями (включающими модели общей циркуляции океана, атмосферы и морского льда) при разных сценариях антропогенного воздействия на климат [13].

Таким образом, результаты исследований говорят о том, что глобальное потепление, сопровождающееся таянием морских льдов в Арктике, в начале XXI в. может приводить к более частым продолжительным периодам сильных морозов, в том числе на европейской территории России. Означает ли это, что зимы в России будут все более и более морозными? Как уже показано (см. рис.6), резкий переход к режиму с относительным похолоданием вновь сменяется потеплением (и циклонической аномалией) при дальнейшем уменьшении площади льда. Значит, при сокращении площади льда в Баренцевом море до 20% и менее следует ожидать достаточно резкого перехода к режиму положительных аномалий температур — и снова к аномально теплым зимам.

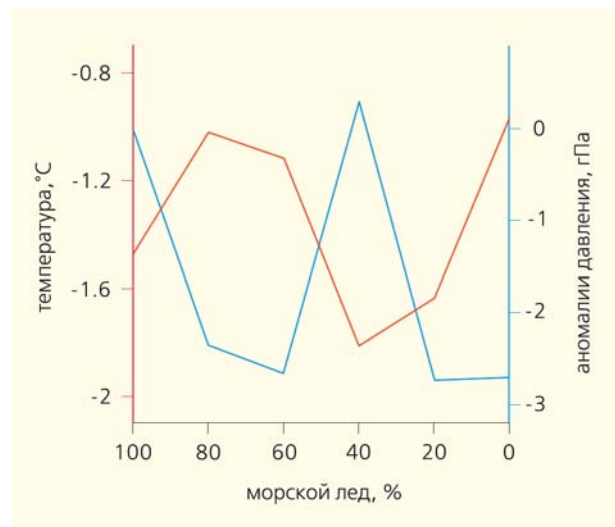


Рис.6. Зависимость изменений температуры воздуха в феврале в Восточной Европе (красная кривая) и аномалии давления воздуха над Баренцевым морем (синяя кривая) от концентрации морского льда в Баренцевом и западной части Карского морей в экспериментах с моделью общей циркуляции атмосферы.

Сколь же долго продлится современный режим с площадью ледяного покрова 40—30%? Некоторые модельные оценки показывают, что уже через 10—15 лет граница распространения льда в Баренцевом море зимой может достичь его восточных берегов (Новой Земли). С другой стороны, океанографические данные свидетельствуют об аномально сильном переносе теплой атлантической воды в Арктику в начале 2000-х годов. Это и могло привести к резкому изменению ледового режима (см. рис.4). Пик поступления атлантических вод в последние годы сошел на нет, и это, возможно, снова приведет к росту площади льда. Кроме того, существует так называемая Атлантическая долгопериодная осцилляция — колебание переноса океанического тепла в высокие широты с периодичностью в 60—70 лет. Эта осцилляция находится сейчас в положительной фазе, а в ближайшее десятилетие должен начаться переход к отрицательной, что также может привести к замедлению таяния льда или даже к росту его площади. Все эти изменения к тому же происходят на фоне парникового эффекта, приводящего к общему нагреву водных масс.

Таким образом, налицо существенная неопределенность в оценках даже направленности изменений будущих ледовых условий в Арктике. А ведь именно современные естественные (не связанные с внешним воздействием) колебания климата в масштабе десятилетий особенно важны. Они могут приводить к тенденциям изменений климатических параметров, противоположным тем, которые вызывает усиливающийся парниковый эффект.

Количественные оценки относительного вклада как внешних факторов, так и внутренней изменчивости до сих пор находятся в очень широком диапазоне. Но в целом в последние 30—40 лет они сопоставимы [14], а значит современный режим может продлиться еще одно-два десятилетия.

Как бы ни менялся климат в ближайшие годы, природные результаты показали, что ледовитость Баренцева моря в зимний период — важный фактор, определяющий аномалии погоды на территории России. В том числе довольно неожиданным образом: путем формирования антициклонической аномалии и морозов над регионами Евразии в результате таяния льда.

Здесь нужно отметить, что особое влияние Баренцева моря на циркуляционные режимы атмосферы было отмечено еще как минимум с 1960-х годов советскими метеорологами. И еще одна интересная деталь. К сожалению, отсутствуют достоверные сеточные данные о состоянии арктического ледяного покрова в середине XX в., которые позволили бы провести модельные исследования. Но оценки, основанные на различных эмпирических данных (а также использование специальных моделей), показали, что в 1940-х годах в зимний период льда было примерно так же мало, как и сегодня. И, возможно, именно этот фактор стал причиной аномально холодных зим 1941/42 и 1942/43 гг., знаменитых в историческом контексте великими победами в битвах под Москвой и Сталинградом.

### Аномальная жара 2010 г.

Летняя жара в июле и августе 2010 г. в европейской части России — хрестоматийный пример экстремального явления [15]. В этот период среднемесячная температура в огромном регионе, по площади превосходящем Германию, превышала норму более чем на 6°C и стала рекордной как минимум за последние 100 лет (см. рис.2). Продолжительный период высоких температур и отсутствие осадков привели к засухе и, как следствие, к лесным и торфяным пожарам. Москва погрузилась в душливый смог. Максимум загрязнения атмосферы пришелся на конец июля — начало августа. В Московском регионе концентрация аэрозольных частиц размером меньше 10 мкм (особенно опасных для здоровья) превышала предельно допустимую в пять раз. Смертность населения в Москве и Поволжье возросла в полтора раза. Причиной экстремальной жары стал блокирующий антициклон, «зависший» над Восточной Европой на целых шесть недель. Температурные аномалии в июле 2010 г. сопровождалась атмосферным давлением, превысившим 6 гПа (рис.7).

Причины жары 2010 г. в России (а также 2003 г. в Европе) невозможно объяснить простым смещением функции распределения температур-

ных аномалий вследствие общего потепления. Вероятность такого события оказывается очень малой (раз в несколько тысяч лет). Для ее увеличения должна измениться структура функции распределения температуры. И такие изменения, сопровождающиеся не только сдвигом среднего значения, но и увеличением изменчивости, действительно происходят в модельных экспериментах при глобальном потеплении [16]. Но эффект от них сравнительно невелик, поэтому вопрос о связи аномальной жары с современными изменениями климата остается открытым. Как и в случае с холодными зимами, попытки воспроизвести жару 2010 г. в экспериментах с использованием наблюдавшихся тем летом значений температуры поверхности океана и границ морского льда оказались неудачными [17]. Это указывало на случайный характер такого события, причина которого могла стать стохастическая динамика атмосферы. Возможно, это связано с несовершенством моделей. Известно, например, что блокирующие антициклоны воспроизводятся ими до сих пор недостаточно реалистично. В глобальной климатической системе в 2010 г. отмечались рекордные аномалии температуры поверхностных вод Атлантического и Индийского океанов и сильное явление Ла-Нинья в экваториальной части Тихого океана. Предполагается, что все это взаимосвязано с системой муссонной циркуляции и аномальной генерацией атмосферных волн. Предложенные механизмы таких связей, однако, пока остаются весьма общими и скорее концептуальными [18].

Существенную особенность формирования аномальной жары 2010 г. выявили исследования, проведенные в Институте вычислительной математики РАН с использованием разработанной там глобальной климатической модели. Эксперименты показали, что такие экстремально высокие температуры могли быть достигнуты только при дополнительной адвекции теплого и сухого воздуха с востока и юго-востока. Таким образом, образованию антициклона должно было предшествовать снижение влажности почвы в Поволжье и южном Предуралье. Это как раз и наблюдалось в 2010 г. и было воспроизведено в модельных экспериментах. Отрицательная аномалия влажности почвы в модели общей циркуляции атмосферы создавалась искусственно. Это увеличивало температуру при формировании блокирующего антициклона более чем на 3°C по сравнению с экспериментом, где поддерживалась среднеклиматическая влажность [19]. Таким механизмом можно объяснить экстремально высокие температуры летом 2010 г.

В ответ на глобальное потепление XXI в. климатические модели предсказывают уменьшение количества осадков в летний период [4] и, соответственно, снижение влажности почвы. Следовательно, стоит ожидать увеличения вероятности



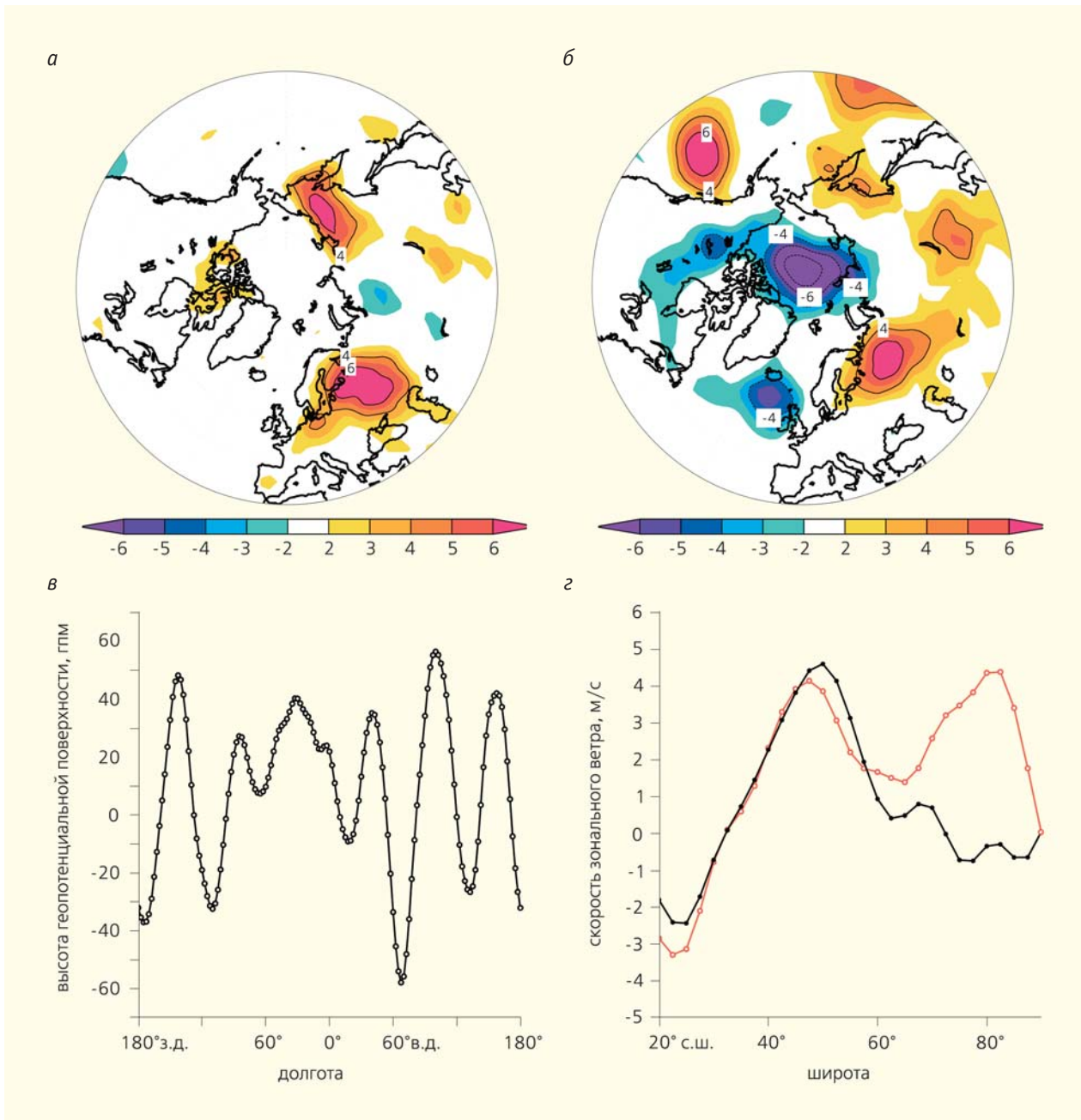


Рис.7. Наблюдавшиеся в июле 2010 г. аномалии: а — приземной температуры (°С), б — атмосферного давления (гПа), в — высоты геопотенциальной поверхности на уровне 300 гПа в широтном поясе 35—45°с.ш., г — осредненных для широтного круга значений зонального ветра на уровне 850 гПа (красная кривая показывает июльские значения для периода 1948—2012 гг.) по данным реанализа NCEP/NCAR [9].

одновременного возникновения блокирующего антициклона в восточноевропейском регионе и засухи в Поволжье и южном Предуралье.

Был ли случай, как следует из результатов модельных экспериментов, московский антициклон в 2010 г, равно как и антициклон над Западной Европой во время европейской волны тепла в 2003 г.? Может оказаться, что нет, если внимательно проанализировать не только региональ-

ные, но и глобальные особенности погоды во время формирования долгоживущих блокирующих аномалий атмосферной циркуляции в последнее время. Как показали недавние работы сотрудников Потсдамского института исследования климатических воздействий (Германия), образование долгоживущих аномалий погоды (в том числе летней жары 2003 и 2010 гг.) может быть связано с особенностями волновой динамики атмосфер-

ной циркуляции, обусловленными недавними климатическими изменениями [20]. Расскажу об этом интересном механизме подробнее.

Известно, что в атмосфере могут образовываться крупномасштабные волновые движения — волны Россби—Блиновой, названные в честь шведского метеоролога К.-Г.Россби и советского ученого Е.Н.Блиновой, открывших их независимо друг от друга. Такие волны также называют планетарными. Необходимое условие их генерации в атмосфере Земли — изменение величины силы Кориолиса с широтой. Волны Россби—Блиновой приводят к возмущению зонального потока в средних широтах и образованию характерной более или менее симметричной картины меандров линий тока атмосферной циркуляции, а также чередующихся максимумов и минимумов различных метеорологических параметров вдоль широтного круга. Существуют квазистационарные планетарные волны, неподвижные относительно земной поверхности. Они генерируются главным образом вследствие орографических (изменения высоты поверхности) и термических (нагрева, охлаждения) возмущений атмосферы, обусловленных широтным распределением океанов и материков. Амплитуда таких волн уменьшается с ростом зонального волнового числа (здесь определяемого как количество волн вдоль широтного круга). Квазистационарные волны с волновым числом 6—8 и пространственным масштабом 2000—3000 км (сравнимым с размером синоптических вихрей — циклонов и антициклонов) очень слабы и обычно не оказывают существенного влияния на формирование погодных аномалий.

Планетарные волны в средних широтах также генерируются синоптическими аномалиями циркуляции. Такие волны называются свободными синоптическими и имеют волновые числа 6 и более, что характерно для движений синоптического масштаба. Эти волны тоже, как правило, имеют небольшую амплитуду и быстро затухают. Ограничивать распространение и сохранять энергию волн способен так называемый волновой канал (или волновод). При его наличии синоптические волны затухают значительно медленнее и распространяются вдоль широтного круга. И в этом случае они могут вступить в резонанс с квазистационарными планетарными волнами с одинаковыми волновыми числами. Это приводит к резкому усилению последних и сопровождается как раз такими явлениями, как летние антициклоны 2003 и 2010 гг. Именно сильные стационарные меридиональные волны, охватывавшие все Северное полушарие, наблюдались в июле 2010 г. Лучше всего такие волны иллюстрируются данными верхней тропосферы — например, аномалиями высоты геопотенциальной поверхности на уровне 300 гПа, представляющими волну с зональным волновым числом 6 (см. рис.7). Волновая структура также выражена и в аномалиях ат-

мосферного давления (см. рис.6) и температуры (что менее заметно).

Волновой канал образуется при бимодальном распределении зональной скорости ветра в атмосфере, которая обычно имеет одногорбое распределение с максимумом вблизи 45°с.ш. (см. рис.7). В период жары 2003 и 2010 гг., а также во время нескольких других подобных явлений, распределение зонального ветра имело еще один максимум в высоких широтах [20]. Это и обусловило появление волновода в средних широтах и волновой резонанс с формированием долгоживущих аномалий атмосферной циркуляции. Образование бимодальной структуры профиля зонального ветра может происходить при уменьшении меридионального температурного градиента, что связано с арктическим усилением глобального потепления.

Таким образом, два фактора, связанные с глобальным потеплением, могли повлиять на возникновение аномальной жары 2010 г. Достижению рекордных температурных отклонений способствовала отрицательная аномалия влажности почвы, вероятность чего должна увеличиваться при потеплении. А вызвать резонанс планетарных волн и долгоживущий блокирующий антициклон могла бимодальная структура зонального потока в Северном полушарии, формированию которой способствует ускоренное потепление в Арктике.

Два рассмотренных выше примера — аномальных зимних морозов последнего десятилетия и экстремальной летней жары 2010 г. — показывают, насколько непростой может быть связь глобального потепления с погодными аномалиями. Следует отметить, что помимо рассмотренных механизмов существует большое количество других факторов, также оказывающих влияние на атмосферную циркуляцию над территорией России. В их числе явление Эль Ниньо — Южная Осцилляция, аномалии муссонной циркуляции (связанные с ростом температуры поверхности океана в последние годы), резкое таяние льда и смещение океанических фронтов. Исследование механизма формирования того или иного погодного экстремального явления требует многостороннего анализа с использованием как численного моделирования, так и эмпирических данных. Существенный прогресс в развитии атмосферных моделей, рост производительности суперкомпьютеров, появление новых, более полных архивов данных наблюдений позволяют надеяться не только на лучшее понимание процессов, приводящих к аномальной погоде, но и на улучшение ее прогнозирования.

В заключение вернусь к проблеме динамики глобальных климатических изменений. В последнее время темпы потепления замедлились, но что стало причиной такого замедления? Это случайная флуктуация климата или проявление естественной долгопериодной изменчивости (связанной, например, с процессами в Северной Атлан-

тике), влияние которой на глобальный климат, возможно, существенно недооценено [14]? Не слишком ли, с другой стороны, быстро растет температура в климатических моделях в ответ на увеличение концентрации парниковых газов в ат-

мосфере [21]? Вызвано ли оно антропогенными факторами или причина — в потеплении верхних слоев океана [22]? Эти вопросы до сих пор остаются открытыми, а научная дискуссия вокруг них только разгорается. ■

**Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-05-00579), Минобрнауки (мегагранты 11.G34.31.0007, 14.V25.31.0026) и Российской академии наук (ГК 74-ОК/11-4, программы ПРАН 4, 31).**

## Литература

1. Hansen J., Ruedy R., Glascoe J., Sato M. GISS analysis of surface temperature change // *Journal of Geophysical Research*. 1999. V.104. №D24. P.30997—31022.
2. Barriopedro D., Fischer E.M., Luterbacher J. et al. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe // *Science*. 2011. V.332. P.220—224.
3. IPCC Special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation / Eds. C.B.Field, V.Barros, T.F.Stocker et al. Cambridge; N.Y., 2012.
4. Semenov V.A., Bengtsson L. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // *Climate Dynamics*. 2002. V.19. P.123—140.
5. Zolina O., Simmer C., Belyaev K. et al. Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years // *Journal of Climate*. 2013. V.26. P.2022—2047.
6. Курганский М.В. Введение в крупномасштабную динамику атмосферы. СПб., 1993.
7. Мохов И.И., Петухов В.К. Блоклинги и их тенденции изменения // *Докл. АН*. 1997. Т.337. №5. С.687—689.
8. Мохов И.И. Действие как интегральная характеристика климатических структур: оценки для атмосферных блоклингов // *Докл. АН*. 2006. Т.409. №3. С.403—406.
9. Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2010. V.115. P.D21111 (DOI:10.1029/2009jd013568).
10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. of the American Meteorological Soc.* 1996. V.77. P.437—470.
11. Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т.48. №4. С.403—421.
12. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Тенденции климатических изменений в высоких широтах Северного полушария: Диагностика и моделирование // *Лед и Снег*. 2013. №2 (122). С.53—62.
13. Yang S., Christensen J.H. Arctic sea ice reduction and European cold winters in CMIP5 climate change experiments // *Geophysical Research Letters*. 2012. V.39. P.L20707 (DOI:10.1029/2012gl053338).
14. Semenov V.A., Latif M., Dommenges D. et al. The impact of North Atlantic-Arctic multidecadal variability on Northern hemisphere surface air temperature // *Journal of Climate*. 2010. V.23. P.5668—5677.
15. Мохов И.И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т.47. №6. С.1—8.
16. Schar C., Vidale P.L., Luthi D. et al. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves // *Nature*. 2004. V.427. P.332—336.
17. Dole R., Hoerling M., Perlwitz J. et al. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? // *Geophysical Research Letters*. 2011. V.38. P.L06702 (DOI:10.1029/2010gl046582).
18. Trenberth K.E., Fasullo J.T. Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012. V.117. P.D17103 (DOI:10.1029/2012jd018020).
19. Володин Е.М. О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры // *Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета РАН «Исследования по теории климата Земли»*. М., 2011. С.48—57.
20. Petoukhov V., Rahmstorf S., Petri S., Schellnhuber H.J. Quasiresonant amplification of planetary waves and recent Northern hemisphere weather extremes // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012. V.110. P.5336—5341.
21. Lindsen R.S., Choi Y.-S. On the determination of climate feedbacks from ERBE data // *Geophysical Research Letters*. 2009. V.36. P.L16705 (DOI:10.1029/2009GL039628).
22. Humlum O., Stordahl K., Solheim J.E. The phase relation between atmospheric carbon dioxide and global temperature // *Global and Planetary Change*. 2013. V.100. P.51—69.