

III. Современное изменение климата Арктики

УДК 551.583+338

Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики

В.М. Катцов, доктор физико-математических наук,
Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Росгидромет,
Б.Н. Порфирьев, доктор экономических наук,
Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН

Приводятся современные оценки наблюдаемых и ожидаемых изменений климата Арктики. Обсуждаются последствия этих изменений. Рассматриваются наиболее крупные научные проблемы, связанные с оценкой будущих изменений климата Арктики и ее роли в изменениях глобального климата на разных временных масштабах. Обоснована неотложность адаптации к текущим и ожидаемым последствиям изменений климата Арктики с его вариациями в целях снижения уязвимости населения и хозяйственных объектов к указанным изменениям. Подчеркнута необходимость и экономическая эффективность учета климатического фактора в программах и проектах развития региона. Особо выделена роль науки как ключевого фактора адаптации российской экономики и общества в целом к изменениям климата.

Арктика – один из наиболее климатически уязвимых регионов мира

В современных исследованиях изменчивости и предсказуемости глобальной климатической системы Арктика занимает все более заметное место. Интерес к ней в последнее время заметно повысился благодаря происходящим в этом регионе быстрым изменениям климата, а также прогнозам, указывающим на так называемое полярное усиление [21] глобального потепления на протяжении всего XXI века. Наблюдаемые и прогнозируемые изменения образуют, в целом, непротиворечивую картину [48].

Арктика – один из четырех регионов мира, отнесенных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) к наи-

более уязвимым к изменениям климата (наряду с малыми островными государствами, Африкой и мегадельтами африканских и азиатских рек [23]). Происходящие и, особенно, ожидаемые воздействия этих изменений на природную среду Арктики велики и, в отличие от многих других регионов планеты, в том числе от других наиболее уязвимых к изменениям климата регионов мира, способны оказывать значительные обратные воздействия на глобальный климат, что означает глобальную значимость климатических изменений в Арктике.

Арктика является средоточием многочисленных и до сих пор недостаточно изученных климатически значимых процессов и обратных связей, действующих в климатической системе [24]. Значительная часть климатических обратных связей

привносится в высокие широты криосферой, в частности – морским льдом со всей присущей ему сложностью динамических и термодинамических процессов. Наряду с криосферой, особенности формирования облачности и атмосферного пограничного слоя, низкое влагосодержание воздуха, необычная стратификация Северного Ледовитого океана, специфическая роль субарктических морей Северной Атлантики в глобальной термохалинной циркуляции (создаваемой градиентами плотности вследствие неоднородности распределения температуры и солёности вод океана) и другие особенности делают Арктику чрезвычайно сложным объектом с точки зрения физико-математического моделирования, прогнозирования [27] и построения климатических сценариев¹.

Признание мировым сообществом важности и актуальности вышеупомянутых научных проблем в последние годы нашло свое отражение в целом ряде широкомасштабных инициатив по изучению климата Арктики и его изменений – как на национальном, так и на международном уровне. Изменения климата в Арктике и их последствия анализируются в оценочных докладах, одним из наиболее всеобъемлющих и детальных из которых на сегодняшний день остается доклад «Оценка климатических воздействий в Арктике» (ACIA), опубликованный в 2005 г. [19]. В нем представлены оценки наблюдаемых и ожидаемых изменений климата Арктики, а также их воздействий на экосистемы, технические объекты и население.

Оценки Рабочей группы Арктического совета по сохранению арктической флоры и фауны (CAFF),

опубликованные в 2010 г. [25], подтверждают выводы вышеупомянутого доклада.² Согласно этим оценкам изменения климата становятся наиболее существенным долгосрочным стрессором для биоразнообразия Арктики. В течение последних десятилетий продолжается исчезновение некоторых уникальных мест обитания арктической флоры и фауны: в частности, в связи с таянием и сокращением площади морского льда, играющего столь важную роль в жизнедеятельности ряда видов животных и птиц, отмечается начало тенденции к снижению численности их популяции. То же происходит и на суше: динамика индекса трендов арктических видов (Arctic Species Trend Index, ASTI) показывает, что за последние три с половиной десятилетия популяция позвоночных сократилась на 10%. Численность таких видов как северный олень и карibu (северный канадский олень) – на треть всего за десятилетие, при том, что популяция большинства видов, исследуемых CAFF, остается устойчивой или даже растет. На суше отмечается наступление древесной растительности на традиционные экосистемы тундры, в том числе трав, мхов, лишайников, площадь которых сокращается, [32].

Выводы этих и некоторых других исследований и оценочных докладов, касающиеся происходящих и ожидаемых в XXI в. изменений климата Арктики и их последствий, [1; 20; 29; 33; 39] фиксируют высокую вероятность сохранения тенденции ускоренного потепления Арктического региона по сравнению с планетой в целом. Далее, природная и техногенная среды Арктики, а также ее население очень уязвимы к изменениям климата. Наконец, как отмечалось выше, Арктика является не только объектом и индикатором, но и важным фактором изменения глобального климата.

Арктический регион является ярким примером трансформации научных проблем в политические. Наблюдаемые в последние десятилетия быстрые изменения климата Арктики и еще большие изменения, ожидаемые в XXI в., могут радикально усугубить существующие или породить новые межгосударственные проблемы, связанные с поиском и добычей энергоносителей, использованием морских транспортных путей и биоресурсов, делимитацией континентального шельфа, состоянием окружающей среды и т.п. Они также могут стать фактором дестабилизации морской (включая военно-морскую) деятельности в этом регионе.

¹ Под климатическим сценарием, вслед за определением МГЭИК, здесь понимается правдоподобная (или вероятная) эволюция климата в будущем, согласующаяся с предположениями о будущих эмиссиях (сценариями эмиссий) парниковых газов и других атмосферных примесей, например, сульфатного аэрозоля, и с существующими представлениями о воздействии изменений концентрации этих примесей на климат. Соответственно, под сценарием изменения климата подразумевается разница между климатическим сценарием и современным состоянием климата. Поскольку сценарии эмиссий основываются на тех или иных предположениях о будущем экономическом, технологическом, демографическом и т.п. развитии человечества, климатические сценарии, равно как и сценарии изменения климата, не следует рассматривать как прогноз, но лишь как внутренне не противоречивые картины возможных в будущем состояний климатической системы. Обсуждение других, не связанных с антропогенными воздействиями, возможных причин изменений климата Арктики можно найти в [17].

² Полностью исследование CAFF и подготовка соответствующего доклада будут завершены в 2013 г.

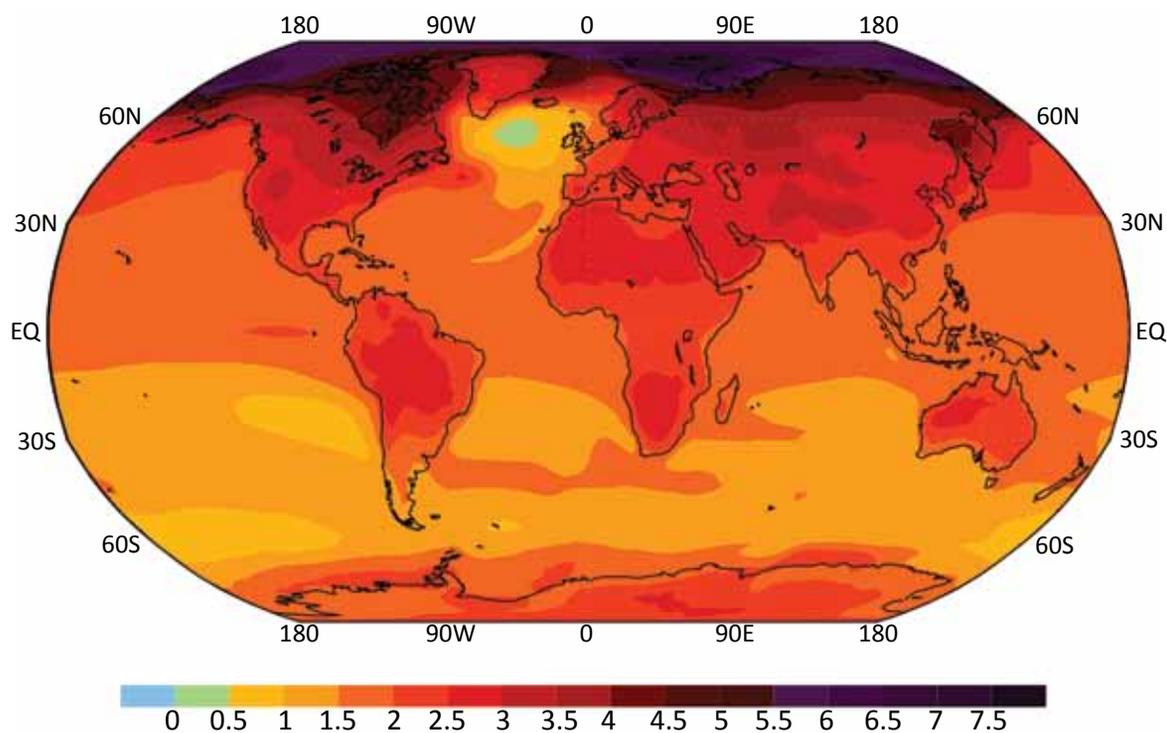


Рис. 1

Географическое распределение среднегодового приземного потепления в конце XXI в.

Приведены результаты осреднения расчетов с помощью ансамбля из 21 климатической модели CMIP5, использующихся в подготовке 5-го оценочного доклада МГЭИК (публикация намечена на 2013 г.) для сценария RCP4.5.

Показаны изменения температуры к 2080–2099 гг. по отношению к периоду 1980–1999 гг.

Изменения климата Арктики в контексте глобального потепления

Согласно данным наблюдений, в течение последних полутора веков происходит глобальное потепление климата, а примерно с середины прошлого XX в. – его заметное ускорение на фоне межгодовой и внутривековой изменчивости. По данным Всемирной метеорологической организации, 2010 г. оказался рекордно теплым за 160 лет инструментальных наблюдений, позволяющих оценить среднюю глобальную температуру [51]. Минувший 2011 г. занял 11-е место в этом ряду.

В Арктике в последние десятилетия изменение климата, прежде всего его потепление, происходило быстрее и масштабнее, чем на остальной части Земного шара, на фоне значительных колебаний. Согласно данным Гидрометцентра России [2], в 2011 г. среднегодовая температура в Арктике достигла абсолютного максимума (за период с 1891 г.). При этом, насколько можно судить по данным наблюдений, а также косвенным данным, позволяющим на основе анализа и применения моделей с разной степенью достоверности восстанавливать некоторые климатические характеристики далекого прошлого, [26] климату Арктики всегда была присуща интенсивная естественная изменчивость.

В этом контексте особенно примечательны дискуссии вокруг двух крупномасштабных эпизодов потепления в Арктике в XX в., одно из которых наблюдалось в первой половине века; второе (продолжающееся до сих пор и уже превысившее по величине первое) началось в 1970-х гг. Предлагаются различные механизмы, объясняющие первое арктическое потепление [22; 46]. Однако, не вызывает сомнений, что оно было обусловлено естественными причинами. Во втором потеплении некоторые исследователи также не усматривают ничего, кроме естественной изменчивости, в то время как другие считают, что, по крайней мере отчасти, это потепление связано с антропогенным воздействием в виде роста концентрации парниковых газов в атмосфере [17; 50]. Если это так, то, с точки зрения предсказуемости, или, точнее, воспроизводимости в модельных расчетах, эти два эпизода потепления в Арктике принципиально различны.

Согласно расчетам физико-математических моделей климата СМIP3 (эти модели создали основу для 4-го оценочного доклада МГЭИК [31]), в XXI в. рост температуры в Арктике будет более чем вдвое превосходить среднее глобальное потепление. Например, в случае реализации «умеренного» сце-

нария A1B (подробнее о сценариях этой группы, рассматривавшихся в [31], см. [43]), в конце XXI в., по сравнению с концом XX в., средняя глобальная температура может увеличиться на 2.8°C, при этом на большей части суши – примерно на 3.5°C, тогда как в Арктике – на 7°C.

Заслуживает упоминания то обстоятельство, что географическое распределение ожидаемых изменений температуры качественно не меняется на протяжении всей истории применения глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана для различных сценариев антропогенного воздействия в виде выбросов парниковых газов в атмосферу. Эта картина, с присущими ей более сильным потеплением суши по сравнению с океаном, а также максимальным потеплением в Арктике, сохраняется и в самых последних расчетах – для новых сценариев эмиссий (т.н. RCP, см. [41]) и с новыми моделями СМIP5, которые будут использованы в 5-м оценочном докладе МГЭИК (публикация намечена на 2013 г.) (рис. 1).

Что касается ожидаемых изменений атмосферных осадков, то Арктика относится к числу регионов мира, где их относительное усиление в текущем столетии максимально. Все современные физико-математические модели прогнозируют рост выпадения осадков на протяжении XXI в., по крайней мере, на большей части территории Арктики [12]. Модели указывают также на понижение атмосферного давления в Арктике в XXI в.

Особую тревогу вызывает скорость таяния ледяного покрова Северного Ледовитого океана. Рекордный минимум за тридцатилетие спутниковых наблюдений был достигнут в 2007 г.; показатель 2011 г. (4.33 млн кв. км) – второй в этом ряду рекордов.³

На сегодняшний день остаются открытыми многие важные вопросы [4; 36; 44], в том числе: каковы механизмы, ответственные за столь быстрое таяние льда в Арктике? Каков относительный вклад естественных и антропогенных факторов в наблюдаемом ускорении? Наконец, с какой интенсивностью будет продолжаться таяние арктического льда и, главное, когда и к каким последствиям приведут эти изменения? Существующие научно обоснованные оценки будущих изменений морского льда в Арктике согласуются качественно, однако разброс их значителен.

³ National Snow and Ice Data Center (NSIDC), University of Colorado, Boulder, USA

Одной из широко обсуждавшихся в научной литературе особенностей климатических моделей СМIP3, использовавшихся в 4-м Оценочном докладе МГЭИК [31], была их предположительная «консервативность», с точки зрения воспроизведения значительного тренда площади льда в Северном полушарии (особенно его сентябрьского минимума). Действительно, за период спутниковых, т.е. наиболее надежных, наблюдений за ледяным покровом Мирового океана площадь сентябрьского льда в Северном Ледовитом океане сокращается с ускорением – к 2011 г. скорость этого сокращения по отношению к периоду 1979–2000 г. превысила 12% за десятилетие (рис. 2). В то же время модели СМIP3 в среднем по ансамблю показывали существенно меньшее значение.

В работе [36] обсуждаются возможные причины указанной «консервативности» моделей СМIP3. В числе прочих затрагивается вопрос о том, насколько от моделей в принципе следует ожидать воспроизведения времени быстрого сокращения площади морского льда, коль скоро соотношение внешнего воздействия (антропогенного потепления) и собственной изменчивости климатической системы в этом случае не оценено. При этом отдельные модели СМIP3 демонстрируют способность генерировать значительную изменчивость ледяного покрова океана, включая эпизоды резкого сокращения морского льда. Новая генерация кли-

матических моделей СМIP5 в среднем по ансамблю уже довольно точно воспроизводят наблюдаемый в последние десятилетия тренд сентябрьской площади морского льда в Северном полушарии, так что говорить о «консервативности» моделей теперь не приходится [13]. При этом исчезновение многолетнего морского льда в Арктике во многих моделях происходит уже в первой половине XXI века (рис. 3).

Еще одним важным следствием и одновременно фактором изменения климата является *деградация вечной мерзлоты*. На северной территории России, на многих ее участках, с конца XX в. происходило увеличение температуры многолетней мерзлоты и глубины протаивания. В Сибири за последние 30 лет произошло смещение зоны активной деградации мерзлоты в восточном направлении – «заозеренность» Западной Сибири сократилась, а Восточной Сибири – выросла. В то же время состояние мерзлоты в Восточном секторе Арктики можно считать пока стабильным [3].

Помимо разнообразных воздействий на разные сектора экономики (прежде всего России, но не только ее), ожидаемые изменения вечной мерзлоты некоторые исследователи связывают с опасностью резкого увеличения потока в атмосферу парниковых газов естественного происхождения, содержащегося в вечной мерзлоте, что должно способствовать усилению парникового

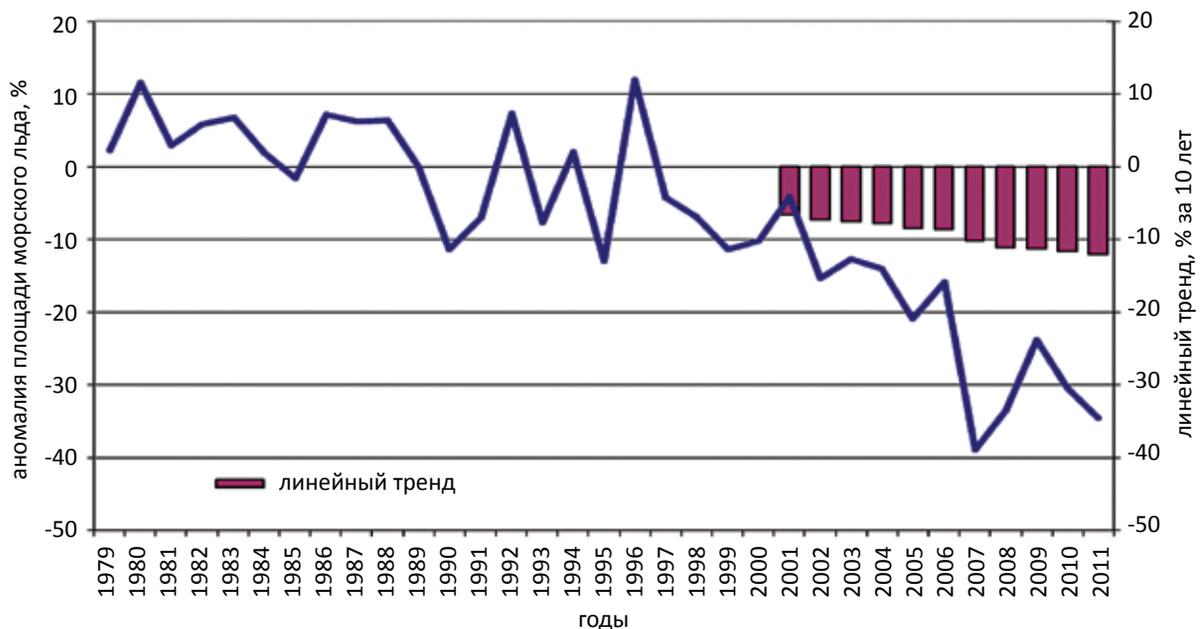


Рис. 2

Аномалии площади морского льда в сентябре в Северном полушарии (в % от среднего значения за 1979–2000 гг.) (синяя линия) и величина линейного тренда (в % за десятилетие) за нарастающий период: 1979–2001 гг., 1979–2002 гг., ..., 1979–2011 гг. (По данным NSIDC)

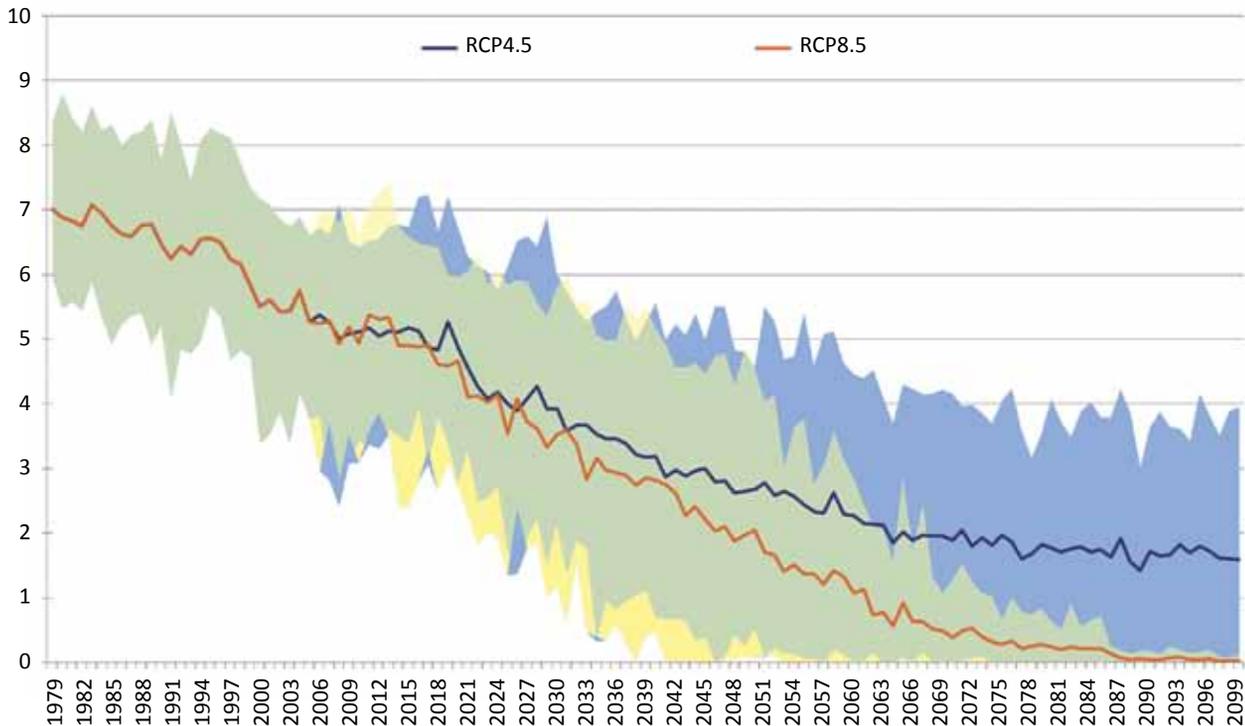


Рис. 3

Площадь морского льда (млн кв. км) в сентябре в Северном полушарии для двух сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему: средняя по ансамблю 17 моделей CMIP5 – для сценария RCP4.5 (синяя линия) и для сценария RCP8.5 (коричневая линия), а также межмодельный разброс в пределах 10-й и 90-й перцентилей (голубая и желтая штриховки, соответственно). Серо-зеленая штриховка показывает области пересечения межмодельных разбросов для двух сценариев

эффекта. Оценки положительной обратной связи между глобальным потеплением и указанными выбросами парниковых газов варьируют от пренебрежимо малых до катастрофических [35]. Неопределенность усугубляется недостаточным пониманием роли арктических экосистем в глобальном углеродном цикле [3; 40].

Глобальный характер присущ еще двум последствиям изменений климата в Арктике. Во-первых, возможным изменениям крупномасштабной циркуляции Мирового океана в результате увеличения экспорта пресной воды из Арктики в Северную Атлантику (в частности, возможно ослабление меридионального переноса тепла в Северной Атлантике из низких в высокие широты с соответствующими последствиями для климата в Европе). Во-вторых, росту уровня Мирового океана вследствие таяния Гренландского ледникового щита, который содержит достаточно воды для подъема уровня до 7 м. При потеплении в интервале 2–5°C это таяние может происходить медленно – многие сотни и даже тысячи лет. Однако не учитываемые в современных климатических моделях динамические процессы в ледниковом щите, по мнению ряда

экспертов, могут существенно ускорить поступление массы льда и воды в океан. Количественные оценки указанных факторов в настоящее время весьма затруднены.

Перечисленные научные проблемы, без сомнения, исключительно серьезны и важны, прежде всего, как факторы значительной неопределенности в оценках будущих изменений климата разных пространственных и временных масштабов. В том числе: будущего арктического льда (десятилетия?); судьбы углерода, содержащегося в вечной мерзлоте (десятилетия, столетия?); глобальных последствий изменений пресноводного бюджета Северного Ледовитого океана (от десятилетий до тысячелетия?); роли динамики ледниковых щитов в подъеме уровня океана (столетия, тысячелетия?).

Этот список вызовов современной климатологии венчает собой фундаментальная проблема предсказуемости климата Арктики. Особенно сложный ее аспект представляет собой предсказуемость на временных масштабах от сезона до десятилетия, т.е. для интервалов времени, в пределах которых антропогенный сигнал слабее естественной изменчивости климата Арктики [42; 49].

Климатические воздействия на окружающую среду и экономику российской Арктики

Изменения климата уже оказывают серьезные воздействия на природные, хозяйственные и социальные системы российской Арктики. Вероятность усугубления этих воздействий высока; ряд ожидаемых последствий – крайне негативен. В то же время, потепление климата повлечет за собой увеличение части так называемых климатических ресурсов⁴ Арктического региона и улучшение климатических условий его развития, хотя сам регион останется в числе территорий с наиболее суровыми погодно-климатическими условиями. Все эти предполагаемые и уже происходящие перемены в условиях хозяйствования имеют огромное значение, учитывая геополитическую и геоэкономическую роль российской Арктики; в частности, то, что именно в этом регионе сосредоточено 60% добычи российской меди, 80% - природного газа, более 90% никеля, кобальта и платиноидов.

Вероятные последствия изменений ледяного покрова Северного Ледовитого океана важны как для экосистем, так и для экономики, социальной сферы и национальной безопасности Российской Федерации [6; 15]. Наиболее существенными представляются следующие последствия, вероятность которых достаточно высока. Прежде всего, увеличение продолжительности летней навигации и развитие в связи с этим морского судоходства [38], включая морские перевозки грузов, а также туризма (включая экотуризм), в первую очередь по Северному морскому пути. При этом высокая степень изменчивости ледовой обстановки может затруднять многие виды морских операций.

Кроме того, облегчится доступ по морю к природным ресурсам Арктики, включая месторождения энергоносителей на шельфе Северного Ледовитого океана, на который, по некоторым оценкам, приходится до 13% мировых запасов нефти [28]. Это откроет новые возможности для развития экономики, создания новых рабочих мест, но одновременно породит дополнительные проблемы для окружающей среды и хозяйственной деятельности.

⁴ Одно из распространенных определений понятия «климатические ресурсы» таково: «климатическими ресурсами называются запасы вещества, энергии и информации в климатической системе, которые используются или могут быть использованы для решения конкретной задачи в экономике или социальной сфере» [10]

В частности, уменьшение ледяного покрова арктических морей, особенно ранней осенью, усиливает разрушительное воздействие штормов на береговую зону, ущерб расположенным в ней хозяйственным объектам, прежде всего инфраструктуре, и угрозы жизни проживающих там людей. Кроме того, более ранние сроки таяния и более поздние сроки восстановления ледяного покрова делают его более хрупким, существенно увеличивая риск, сокращая сроки и эффективность охоты коренных жителей региона [45].

Потепление климата может привести к развитию некоторых рыбных промыслов, включая вылов сельди и трески, при этом районы обитания и пути миграции многих видов рыбы изменятся. В то же время, ожидаемые изменения ледяного покрова Северного Ледовитого океана могут резко ухудшить условия и среду обитания некоторых видов фауны, таких, например, как белый медведь.

Одной из важнейших экономических проблем, возникающих в связи с ожидаемыми изменениями ледяного покрова Мирового океана (не только в Северном Ледовитом, но и в Южном океане), является будущее ледокольного флота. Согласно выводам доклада Национального исследовательского совета США, подготовленного в 2005 г. для Комитета по оценке роли и будущих потребностей полярных ледоколов Береговой охраны США и др. ведомств этой страны [47], а также исследований, выполненных в 2007–2008 г. в России Советом по изучению производительных сил Минэкономразвития России, необходимо не только не сокращать, но, напротив, развивать ледокольный флот, включая использование больших ледоколов. В условиях теплеющей Арктики ожидается, с одной стороны, облегчение доступа судов в высокие широты и увеличение экономической и другой активности в этом регионе; с другой – сохранение, по меньшей мере, сезонного ледяного покрова (хоть и меньшей толщины, сплоченности и протяженности), а также рост количества айсбергов, затрудняющих доступ судов в Северный Ледовитый океан. Ледоколы призваны помочь решать возрастающий круг задач, обеспечивая постоянное присутствие исследовательских и других судов в Арктическом регионе.

Под влиянием потепления климата будет происходить *деградация вечной мерзлоты*, включая увеличение толщины сезонно-талого слоя (рис. 4) и отрыв замерзающей части этого слоя от глубинных толщ вечной мерзлоты [14]. Тундровые ландшафты отличаются высокой уязвимостью к внешним воз-

действиям, и протаивание многолетне-мерзлых грунтов будет сопровождаться их просадками и уменьшением прочностных характеристик, обводнением или обсыханием территории. Это влечет за собой угрозу надежности и устойчивости строительных конструкций и инженерных сооружений, не говоря уже об ухудшении условий для традици-

Наиболее значимым и разрушительным по своим возможным последствиям по отношению к сооружениям является полный отрыв верхней кромки многолетне-мерзлых грунтов от толщ реликтовой мерзлоты, расположенных ниже. В этом случае появляется слой талых грунтов, не промерзающих зимой, и свойства многолетне-

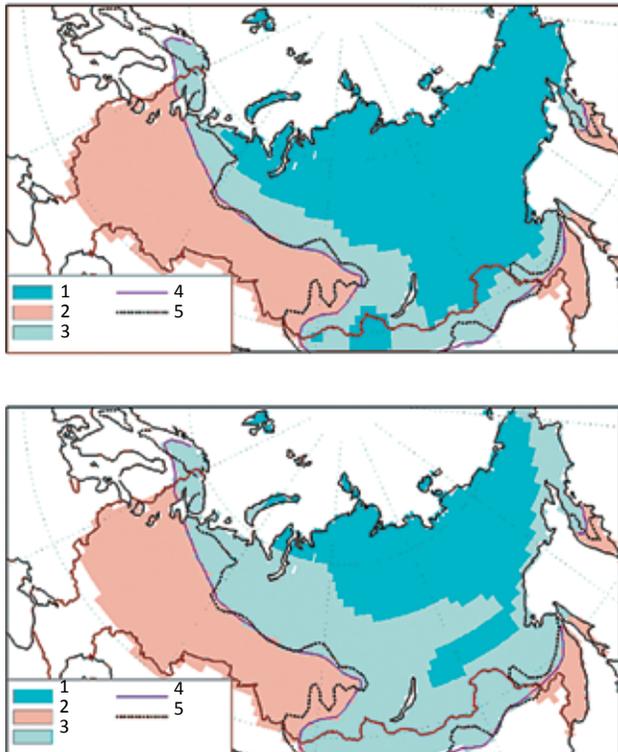


Рис. 4
 Деградация вечной мерзлоты на территории России к середине XXI в. для сценария RCP8.5. Показаны рассчитанные с помощью ансамбля климатических моделей CMIP5 зоны сезонного протаивания (1) и сезонного промерзания (2) в середине (вверху) и в конце (внизу) XXI века для суглинистых почв; (3) – зона перехода от режима сезонного протаивания к режиму сезонного промерзания в верхнем 3-метровом слое грунта; (4) – положение границы зоны вечной мерзлоты по модельным расчетам, определяемое как положение нулевой изотермы на глубине 3 м. (5) – современная наблюдаемая граница зоны вечной мерзлоты

онного сохранения продуктов в погребах домашних хозяйств. Главные риски касаются объектов хозяйственной инфраструктуры и магистральных трубопроводов, что особенно важно для территории севера Западной Сибири, учитывая низинный и равнинный характер местности с преобладанием грунтов органического происхождения, а также наличие в этом районе крупнейшей газоносной провинции, являющейся основным источником ресурсов газа России.

Более значительному протаиванию подвержены песчаные грунты. Поскольку преобладание таких грунтов в северной части Западной Сибири характерно для русел рек, постольку наиболее уязвимыми из многочисленных видов инженерных сооружений будут портовые объекты и другие сооружения инфраструктуры водного транспорта. Песчаные грунты также преобладают на территории полуострова Ямал, на месторождениях которого в ближайшие годы планируется начать добычу газа.

мерзлых грунтов не будут отличаться от обычных условий, характерных, например, для умеренной климатической зоны Европейской части территории России. При таком развитии процессов вечная мерзлота сохраняется лишь на больших глубинах, превышающих толщины грунтов, затрагиваемых при инженерно-строительной деятельности. Но в первые десятилетия XXI в. подобные явления наметятся лишь в крайних южных районах зоны вечной мерзлоты, которые сейчас характеризуются как районы островной мерзлоты. Как показывают расчеты, изменение многолетне-мерзлых грунтов в Западной Сибири явится существенным фактором, который окажет воздействие на работу топливно-энергетического комплекса в XXI в.

Ожидаемые изменения гидрологического режима сопряжены с *ростом риска наводнений* в устьях некоторых из рек, впадающих в Северный Ледовитый океан. Как известно, на водосборах в средних широтах максимальный сток наблюдается весной – в период интенсивного таяния снега.

Результаты расчетов показывают, что на водосборе Оби на протяжении XXI в. сокращение массы снега к началу весны (март) превышает уменьшение такой массы к концу весны (в мае), тогда как на водосборах Енисея и Лены прогнозируется иная ситуация – заметное увеличение накопленной за зиму массы снега (март) и уменьшение массы снега в мае (т.е. большее количество снега тает за более короткое время). Таким образом, вероятность крупных весенних паводков на этих водосборах на протяжении XXI в. существенно возрастает [11; 34; 37].

Другие примеры прямых воздействий изменяющегося климата на окружающую среду и население Арктики включают:

- Ускоренную *эрозию берегов* в результате штормовой активности и даже утрату территорий, в том числе в результате таяния вечной мерзлоты (по некоторым оценкам, уже потерянная часть суши на побережье Северного Ледовитого океана измеряется квадратными километрами).
- Общую тенденцию *увеличения продуктивности северных экосистем* в течение последних десятилетий при существенной неоднородности этого процесса: если в одних районах продуктивность растет, то в других – снижается [30].
- *Сокращение или исчезновение, и/или миграцию* существующих видов растительных и живых организмов. Так, сокращение ледового периода ведет к уменьшению популяции организмов, в частности отдельных видов фитопланктона, жизнедеятельность которого неразрывно связана с наличием ледяных полей, таких как криль, являющийся основой питания практически всех морских птиц и млекопитающих, благополучие и сама жизнь которых также оказывается под угрозой. В то же время, в последние годы из-за ускоренного сокращения площади ледяного покрова отмечается миграция тысяч особей моржей на берег как в России, так и в США (Аляска) [45].
- Согласно некоторым оценкам [3], при сохранении современных тенденций изменений климата, к концу XXI в. около 20% современной площади тундры и полярных пустынь будут замещены другими типами растительности. Другие изменения касаются замещения некоторых традиционных биологических видов и экосистем пресных и морских вод [3], в т.ч. в связи с *инвазией* (вторжением) новых видов растений, насекомых, микроорганизмов, угрожающих некоторым традиционным биологическим

видам и экосистемам суши, пресных и морских вод Арктики, а также создающих риски и угрозы здоровью и жизни людей, работающих или несущих службу в этом регионе;

- Новые *угрозы здоровью* коренного населения, в том числе из-за изменений жизненного уклада, структуры питания и занятости. В Арктическом регионе социальные последствия климатических изменений, в том числе для здоровья населения, наиболее ощутимы, что связано, в первую очередь, с тем, что здесь находятся районы проживания коренных малочисленных народов Севера, многие из которых по-прежнему занимаются традиционным ведением хозяйства. Эти районы характеризуются, с одной стороны, дефицитом квалифицированной медицинской помощи, с другой стороны, как уже отмечалось выше, возможностью проникновения с юга новых инфекционных заболеваний и активизацией старых инфекций в результате изменения ареала возбудителей и многих других причин.

Особо следует отметить опасность усиления *системного (синергического) эффекта совокупности воздействий*. Примером является усугубление антропогенных рисков и угроз хрупким экосистемам Арктики в результате облегчения доступа и интенсификации освоения Арктики, включая загрязнение окружающей среды и уничтожение видов флоры и фауны. При этом специфика российской Арктики – по сравнению с Аляской, севером Канады, Гренландией, арктическими территориями Скандинавских стран – заключается в повышенной значимости социальных рисков (по сравнению с природно-экологическими), учитывая значительно бóльшую численность населения. В российской части Арктики расположены 46 городов и поселков с населением в пять и более тысяч жителей, а также крупнейшие в мире металлургические производства, рудники, горно-обогатительные комбинаты, угольные шахты, полигоны испытаний ядерного оружия, места захоронения радиоактивных отходов и другие экологически опасные объекты.

Изменения климата и устойчивое развитие российской Арктики

Для обеспечения устойчивого развития российской Арктики с учетом фактора изменений климата необходим переход к стратегическому типу планирования, сочетающему долгосрочную

перспективу с системным подходом к разработке и реализации экономических программ и отдельных проектов и «встраивающему» указанный фактор в планы развития территорий и производственных комплексов региона. Такая увязка призвана обеспечить снижение негативных последствий и максимальное использование благоприятных возможностей, которые открываются благодаря климатическим изменениям, как непосредственно, так и опосредованно (через внедрение энергоэффективных и энергосберегающих технологий). Кроме того, она должна способствовать укреплению безопасности в Арктическом регионе (например, путем развития систем мониторинга и раннего оповещения об опасных явлениях, программы адресной работы с коренными народами и другими особо уязвимыми группами населения Арктики и т.д.) и национальной безопасности России в целом.

Стратегию развития Арктического региона необходимо гармонизировать с Комплексным планом реализации Климатической доктрины Российской Федерации⁵ – во исполнение распоряжения Правительства Российской Федерации от 25 апреля 2011 г. Необходимо разработать программные меры по смягчению последствий и адаптации к наблюдаемым и прогнозируемым изменениям климата в российской Арктике, включая создание финансовых и институциональных механизмов, а также технологий снижения климатических рисков, развитие исследований климата и анализа и оценки эффективности различных мер адаптации.

Большинство краткосрочных мер не требует значительных инвестиций и может быть интегрировано в уже существующие или разрабатываемые региональные стратегии социально-экономического развития. Для реализации дальнейших шагов потребуются более существенные финансовые вложения, а также вовлечение большего числа сторон на федеральном, региональном и местном уровнях. В то же время, предусматриваемые стратегией долгосрочного развития страны модернизация экономики и переход на инновационный путь развития, вероятно, позволят снизить затраты и сократят сроки осуществления этих задач в будущем.

На всех этапах важная роль должна отводиться просветительской деятельности, а также развитию и укреплению сотрудничества между регионами Арктической зоны России и зарубежных стран. Следует учесть, что многие подходы в области смягчения последствий изменения климата и адаптации уже успешно опробованы в других странах. Также представляется целесообразным использовать опыт и потенциал международных организаций, таких как ПРООН, ЮНЕП, ОЭСР, Всемирный банк и др.

Будущее Арктики как вызов климатической науке

Как отмечается в работах [8; 16], после впечатляющих достижений мировой климатической науки, включая успех докладов МГЭИК, оцененных в 2007 г. Нобелевской премией мира, некоторые политические и общественные деятели поспешили заключить, что климатическая наука, в основном, выполнила свои задачи. По их мнению, задачи, стоящие перед наукой о климате, в целом, решены, и остается уточнить лишь некоторые детали, уже не столь важные для процесса принятия решений.

Другие политики, ухватившись за отдельные (впрочем, крайне немногочисленные) неточности указанных докладов, напротив, подвергли все и вся сомнению, вплоть до полного обесценивания проделанной большой и полезной работы.

Обе крайности представляются абсолютно неприемлемыми. Первая – потому, что означает игнорирование сохраняющихся лакун в научном знании, особенно в понимании причин и последствий изменений климата, в прояснении которых дальнейшие исследования (в том числе, Арктики) невозможно переоценить. Вторая – потому, что современный уровень научных знаний вполне позволяет говорить о неотложности действий как в части адаптации к текущим и ожидаемым изменениям климата (в том числе, в Арктике), так и в части смягчения воздействия человека на климатическую систему (и окружающую среду в целом). Пробелы в понимании происходящего связаны с недостатком данных наблюдений, а также с проблемами моделирования климата. Восполнение этих пробелов являются необходимым условием уточнения оценок будущих изменений климата и их последствий, в частности, в Арктике, которые, в свою очередь, являются необходимой предпосылкой для принятия эффективных решений, как в сфере экономики, так и экологии, включая охрану природы.

⁵ Климатическая доктрина Российской Федерации утверждена Президентом Российской Федерации 17 декабря 2009 г.

Выполнение этой предпосылки снижает, но не устраняет неопределенность оценок будущих изменений климата. Каков бы ни был прогресс в наблюдениях и моделировании, хаотическая природа климатической системы всегда будет влиять на точность и надежность этих оценок, обуславливая, таким образом, их вероятностный характер. Поэтому принятие решений всегда будет носить характер поиска «второго наилучшего» (*second best*) и будет связано с рисками просчетов в планировании и реализации мер по смягчению последствий изменений климата, прежде всего, мер упреждающей адаптации наиболее уязвимых регионов, таких как Арктика, к указанным изменениям. Цена таких ошибок может быть очень высока. Поэтому в целях снижения рисков инвестирование в научные исследования (в частности и в особенности, Арктики) является одновременно необходимым и экономически целесообразным, позволяя уменьшить неопределенность региональных прогнозов и оценок изменений климата и, соответственно, последствий этих изменений.

Важно отметить, что альтернативы науке здесь попросту не существует и, в связи с этим, следует обратить особое внимание на существующий в России недостаток знаний фундаментального и прикладного характера, ее отставание в области исследований климата от наиболее развитых стран. Последнее усугубляет зависимость России от получения современных данных и знаний о происходящих переменах и оценок будущих изменений климата и их последствий от зарубежных исследовательских центров.

Объективная оценка сложившейся ситуации дана в решении созданного Росгидрометом в 2009 г. VI Всероссийского метеорологического съезда [7; 18]: «В последние десятилетия XX в., по мере перехода мировой метеорологической науки в «высокотехнологическую» фазу, наша страна проигрывала в соревновании компьютерных технологий. Смена государственной системы и экономического уклада в начале 1990-х гг. привела к общему кризису отечественной науки, который не преодолен до сих пор. Российская наука потеряла целое поколение исследователей. Начиная с 1990-х гг. российская метеорологическая наука жила, в основном, достижениями предшествующих десятилетий. К началу XXI в. Россия утратила лидирующие позиции в мировой метеорологической науке. На мировом или близком к мировому уровню остаются лишь отдельные направления. Научное сообщество малочисленно и разоб-

щено. Понижился уровень научной экспертизы. Процветает дилетантизм. Как следствие, авторитет науки в обществе и у руководства страны невысок, что снижает возможности науки с должной эффективностью влиять на развитие страны и тем самым усугубляет экономические и другие проблемы российского общества». Угроза дилетантизма, угроза дезориентации руководства России в отношении проблемы изменения климата до настоящего времени остается весьма актуальной.

Снижение перечисленных выше рисков и угроз требует конкретных мер со стороны государства, которое лишь недавно всерьез занялось формированием приоритетов своей политики в отношении проблемы изменений климата в целом и в Арктике, в частности. Это нашло свое отражение в Климатической доктрине Российской Федерации. Ее научный фундамент заложен профессиональными исследованиями, проводимыми отечественными и зарубежными климатологами. В самой доктрине особое внимание уделяется научному обеспечению политики Российской Федерации в области климата, включая обеспечение соответствия национальных климатических исследований мировому уровню. Доктрина, помимо прочего, предписывает разработку и реализацию соответствующей государственной стратегии и, на ее основе, федеральных, региональных и отраслевых программ и планов действий, в том числе в отношении Арктики.

Основой этих документов должны стать результаты масштабных научных исследований, которые сами по себе являются объектом планирования, причем приоритетным. С этой точки зрения трудно переоценить разработку Комплексного плана научных исследований погоды и климата до 2020 г., выполненную Росгидрометом совместно с Российской академией наук, Министерством образования и науки России, Министерством экономического развития России, МЧС России и другими ведомствами в соответствии с решением Совета Безопасности от 17 марта 2010 г. (подробнее см. [5; 9]).

Реализация Комплексного плана научных исследований погоды и климата, а также создание и функционирование Климатического центра Российской Федерации, предусмотренные вышеупомянутым распоряжением Правительства «Комплексный план реализации Климатической доктрины Российской Федерации на период до 2020 года» (от 25 апреля 2011 г.), являются важнейшими шагами в разработке государственной

политики, а также научно-технических разработок и технологических решений в области адаптации населения, хозяйственных систем и системы обеспечения национальной безопасности России, включая и арктическое направление, к изменениям климата.

Благодарности

Настоящая работа выполнена в рамках ЦНТП-3 Росгидромета, а также при поддержке РФФИ (гранты №№ 11-05-00734 и 09-05-00814), а также РГНФ (грант № 12-32-06001). Авторы благодарят В.А. Говоркову и Т.В. Павлову за проведенные расчеты и подготовленные рисунки к настоящей статье. Авторы признательны международному сообществу разработчиков климатических моделей за предоставление данных для анализа; участникам Программы диагноза и сравнения климатических моделей (PCMDI) за сбор и хранение модельных данных CMIP3 и CMIP5; Рабочей группе по объединенным моделям (WGCM) Всемирной программы исследований климата (WCRP) – за организацию деятельности по анализу модельных расчетов. Архив данных WCRP CMIP3 и CMIP5 поддерживается управлением науки Министерства энергетики США.

Литература:

1. Бедрицкий А.И. и др., ред., 2008: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. в 2 томах, Росгидромет, 2008 г.
2. Бирман Б.А. и Бережная Т.В., 2012: Основные погодно-климатические особенности Северного полушария Земли. 2011 год. Аналитический обзор. Гидрометцентр России. 56 с.
3. Букварева Е.Н., 2011: Роль наземных экосистем в регуляции климата и место России в посткиотском процессе. М., С. 63
4. Катцов В.М., Алексеев Г.В., Павлова Т.В., Спорышев П.В., Бекряев Р.В., Говоркова В.А., 2007: Эволюция ледяного покрова Мирового океана в 20-м и 21-м веках в расчетах с глобальными климатическими моделями нового поколения. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43, №2, 1–17.
5. Катцов В.М., Кобышева Н.В., Мелешко В.П., Порфирьев Б.Н., Ревич Б.А., Сиротенко О.Д., Стадник В.В., Хлебникова Е.И., Чичерин С.С., Шалыгин А.Л., 2011: Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу. (Катцов В.М. и Порфирьев Б.Н., ред.) Росгидромет, С. 251.
6. Катцов В.М., Мелешко В.П., Чичерин С.С., 2007: Изменение климата и национальная безопасность Российской Федерации. Право и безопасность, №1–2, С. 29–37.
7. Катцов В.М. и Мохов И.И., 2011: Приоритеты российских исследований в области метеорологии. Труды 6-го всероссийского метеорологического съезда, Росгидромет, СПб, 27–35.
8. Катцов В.М. и Порфирьев Б.Н., 2011а: Арктика: изменения климата и их воздействия на окружающую среду в кн.: Евроатлантическое пространство безопасности [Дынкин А.А. и Иванов И.С., ред.], 350–358.
9. Катцов В.М. и Порфирьев Б.Н., 2011б: Оценка макроэкономических последствий изменения климата на территории Российской Федерации на период до 2030 года и дальнейшую перспективу (Резюме) Труды ГГО, 563, 7–59.
10. Кобышева Н.В., и Хайруллин К.Ш. (ред.), 2005: Энциклопедия климатических ресурсов. СПб, Гидрометеиздат, 320 с.
11. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Малевский-Малевиц С.П., Надежина Е.Д., Спорышев П.В., 2004: Антропогенные изменения климата в 21-м веке в северной Евразии. Метеорология и гидрология, № 7, С. 5–26.
12. Мелешко В.П., Катцов В.М., Говоркова В.А., Надежина Е.Д., Павлова Т.В., Спорышев П.В., Школьник И.М., Шнееров Б.Е., 2008: Изменения климата России в 21-м веке. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. (Бедрицкий А.И. и др., ред.), в 2 томах, Росгидромет, т.1, 174–213.
13. Павлова Т.В., Катцов В.М., Говоркова В.А., 2011: Морской лед в моделях CMIP5: ближе к реальности? Труды ГГО, 564, 7–18.
14. Павлова Т.В., Катцов В.М., Надежина Е.Д., Спорышев П.В., Говоркова В.А., 2007: Расчет эволюции криосферы в 20-м и 21-м веках

- с использованием глобальных климатических моделей нового поколения. Криосфера Земли, 11, -№ 2, 3–13.
15. *Порфирьев Б.Н.*, 2010: Глобальные изменения климата: угроза или фактор международной безопасности? В сб. Проблемы экономической безопасности Евроатлантического региона. Материалы ситуационного анализа в рамках проекта Евроатлантическая инициатива в области безопасности (EASI). (Москва, 29 июня 2010 г.). М: ИМЭМО РАН, 40–43.
 16. *Порфирьев Б.Н.*, Катцов В.М., Рогинко С.А., 2011: Изменения климата и международная безопасность. Российская академия наук. 290 сс.
 17. *Спорышев П.В.*, Мирвис В.М., Катцов В.М., Мелешко В.П., Ратькова Э.Я., 2008: Антропогенный вклад в изменение климата. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том I. Изменения климата (А.И. Бедрицкий и др., ред.), Росгидромет, 152–173.
 18. *Труды VI Всероссийского метеорологического съезда.* Обнинск – ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2011, 220 с.
 19. *ACIA*, 2005: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 1042 pp.
 20. *AMAP*, 2011. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xii + 538 pp.
 21. *Bekryaev, R.V.*, I.V. Polyakov, V.A. Alexeev, 2010: Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming. *J.Climate*, 23, 3888–3906. doi: 10.1175/2010JCLI3297.1
 22. *Bengtsson L.*, Semenov V.A., Johannessen O.M., 2004: The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic – a Possible Mechanism. *J. Climate*, 17, 4045-4057
 23. *Bernstein, L.*, P. Bosch, O. Canziani, Zh. Chen, R. Christ, O. Davidson, W. Hare, S. Huq, D. Karoly, V. Kattsov, Z. Kundzewicz, J. Liu, U. Lohmann, M. Manning, T. Matsuno, B. Menne, B. Metz, M. Mirza, N. Nicholls, L. Nurse, R. Pachauri, J. Palutikof, M. Parry, D. Qin, N. Ravindranath, A. Reisinger, J. Ren, K. Riahi, C. Rosenzweig, M. Rusticucci, S. Schneider, Y. Sokona, S. Solomon, P. Stott, R. Stouffer, T. Sugiyama, R. Swart, D. Tirpak, C. Vogel, G. Yohe, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 24. *Bony, S.*, R. Colman, V. Kattsov, R. Allan, C. Bretherton, J.-L. Dufrense, A. Hall, S. Hallegatte, M. Holland, W. Ingram, D. Randall, B. Soden, G. Tselioudis, M. Webb, 2006: How Well do we Understand and Evaluate Climate Change Feedback Processes? *J.Climate*, 19, 3445-3482.
 25. *CAFF* (Conservation of Arctic Flora and Fauna), 2010: Arctic Biodiversity Trends 2010 – Selected indicators of change, CAFF International Secretariat, Akureyri, Iceland, May 2010.
 26. *CCSP*, 2009: Past Climate Variability and Change in the Arctic and at High Latitudes. A report by the U.S. Climate Change Science Program and Subcommittee on Global Change Research [Alley, R.B., J. Brigham-Grette, G.H. Miller, L. Polyak, and J.W.C. White (coordinating lead authors)]. U.S. Geological Survey, Reston, VA, 257 pp.
 27. *Frolov, A.V.*, V.M. Kattsov, 2009: Predicting arctic climate: knowledge gaps and uncertainties. Proceedings of the international experts meeting «Climate Change and Arctic Sustainable Development: scientific, social, cultural and educational challenges», Monaco, 3-6 March 2009, 292–302.
 28. *Gautier, D. L.*, K. J. Bird, R. R. Charpentier, A. Grantz, D. W. Houseknecht, T. R. Klett, T. E. Moore, J. K. Pitman, C. J. Schenk, J. H. Schuenemeyer, K. Sorensen, M. E. Tennyson, Z. C. Valin, and C. J. Wandrey, 2009: Assessment of Undiscovered Oil and Gas in the Arctic. *Science* 324(5931):1175-1179.
 29. *Glomsrod, S.*, and I. Aslaksen (eds.), 2009: The economy of the North 2008. Statistics Norway, 102 p.
 30. *Goetz S.J.*, Mack M.C., Gurney K.R., Randerson J.T., Houghton R.A., 2007: Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America, *Environ. Res. Lett.*, doi:10.1088/1748-9326/2/4/045031.
 31. *IPCC*, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.
 32. *Johnsen, K. I.*, Alfthan, B., Hislop, L., Skaalvik, J. F. (Eds). 2010. Protecting Arctic Biodiversity, United

- Nations Environment Program (UNEP), GRID-Arendal. Oslo: Birkeland Trykkeri AS, P. 20–22.
33. Karl, T.R., J.M.Melillo, T.C. Peterson (eds.), 2009: Global Climate Change Impacts in the United States, Cambridge Univ. Press, 189 p.
 34. Kattsov, V., V. Govorkova, T. Pavlova, P. Sporyshev, 2008: Arctic river runoff in the context of global warming: Projections with state-of-the-art global climate models. CliC Ice and Climate News, No.11, 8–10.
 35. Kattsov, V. K. Hibbard, A. Rinke, V. Romanovsky, D. Verseghy T.R. Christensen, P. Kuhry, D. Lawrence, D. McGuire, 2009: Terrestrial permafrost carbon in the changing climate. CliC/WCRP and AIMES/IGBP White paper. www.climate-cryosphere.org/documents/doc6_CAPER_WP_final.pdf.
 36. Kattsov, V., V. Ryabinin, J. Overland, M. Serreze, M. Visbeck, J. Walsh, W. Meier, and X. Zhang, 2010: Arctic sea ice change: a grand challenge of climate science. Journal of Glaciology, 56, No.200, 1115-1121.
 37. Kattsov, V.M., J.E. Walsh, W.L. Chapman, V.A. Govorkova, T.V. Pavlova, and X. Zhang, 2007: Simulation and Projection of Arctic Freshwater Budget Components by the IPCC AR4 Global Climate Models. J.Hydrometeorology, 8, 571-589.
 38. Khon V. C., I. I. Mokhov, M. Latif, V. A. Semenov, W. Park, 2010: Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the twenty-first century, Climatic Change, doi: 10.1007/s10584-009-9683-2.
 39. Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J., and Bush, E., editors (2008): From Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate 2007; Government of Canada, Ottawa, ON, 448 p.
 40. McGuire, A.D., L. Anderson, T.R. Christensen, S. Dallimore, L. Guo, D. Hayes, M. Heimann, T. Lorenson, R. Macdonald, and N. Roulet, 2009: Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic climate change. Ecological Monographs, 79(4), 523–555.
 41. Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant, and T. J. Wilbanks, 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463:747-756.
 42. Murphy, J., V. Kattsov, N. Keenlyside, M. Kimoto, J. Meehl, V. Mehta, H. Pohlmann, A. Scaife, D. Smith, 2010: Towards Prediction of Decadal Climate Variability and Change. Procedia Environmental Sciences 1, 287–304, doi:10.1016/j.proenv.2010.09.018.
 43. Nakićenović N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grüber, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, Z. Dadi, 2000: IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
 44. National Research Council of the National Academies, 2003: Understanding climate change feedbacks. Washington D.C., National Academies Press, 152 p.
 45. National Research Council of the National Academies, 2011: Frontiers in Understanding Climate Change and Polar Ecosystems: Summary of a Workshop. Washington D.C., National Academies Press, 78 p.
 46. Overland J.E., Spillane M.C., Percival D.B., Wang M., Mofjeld H.O., 2004: Seasonal and regional variation of Pan-Arctic air temperature over the instrumental record. J. Climate, 17, 3263-3282.
 47. Polar Icebreaker Roles and U.S. Future Needs: A Preliminary Assessment. Committee on the Assessment of U.S. Coast Guard Polar Icebreaker Roles and Future Needs, Polar Research Board Division on Earth and Life Studies, Marine Board, Transportation Research Board. National Research Council of the National Academies. The National Academies Press, Washington, D.C., 2005, 42 p.
 48. Serreze M.C., Francis J.A., 2006: The arctic amplification debate. Climatic Change, doi:10.1007/s10584-005-9017-y.
 49. Shepherd, T.G., J.M. Arblaster, C.M. Bitz, T. Furevik, H. Goosse, V.M. Kattsov, J. Marshall, V. Ryabinin, J.E. Walsh, 2011: Report on WCRP Workshop on Seasonal to Multi-Decadal Predictability of Polar Climate (Bergen, Norway, 25-29 October 2010). SPARC Newsletter No. 36, January 2011, 11-19.
 50. Wang M., Overland J.E., Kattsov V., Walsh J.E., Zhang X., Pavlova T., 2007: Intrinsic versus forced variation in coupled climate model simulations over the Arctic during the 20th Century. J. Climate, 20, 1084-1098.
 51. WMO, 2012: WMO statement on the status of the global climate in 2011. WMO-No. 1085, 21 p.