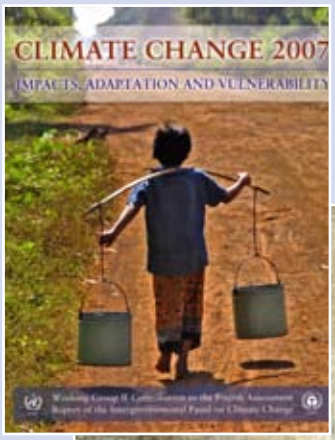
WWF

for a living planet®

ПОЛЯРНЫЕ РЕГИОНЫ (АРКТИКА И АНТАРКТИКА).
ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЯ



НЕОФИЦИАЛЬНЫЙ ПЕРЕВОД ГЛАВЫ 15 РАБОЧЕЙ ГРУППЫ 2 ЧЕТВЕРТОГО ОЦЕНОЧНОГО ДОКЛАДА МЕЖПРАВИТЕЛЬСТВЕННОЙ ГРУППЫ ЭКСПЕРТОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА (МГЭИК)

Полярные регионы (Арктика и Антарктика) Изменение климата и его последствия

Неофициальный перевод Главы 15
Рабочей группы 2 Четвертого оценочного доклада
Межправительственной группы
экспертов по изменению климата (МГЭИК)

Ведущие авторы-составители:

Олег А. Анисимов (Россия), Девид Г. Воган (Великобритания)

Ведущие авторы:

Терри Кэллахан (Швеция), Кристофер Фергал (Канада), Харви Марчант (Австралия), Терри Д. Прауз (Канада), Хьялмар Вильямсон (Исландия), Джон Е. Уолш (США)

Авторы:

Торбен Р. Кристенсен (Швеция), Доналд Л. Форбс (Канада), Фредерик Е. Нелсон (США), Марк Натталл (Канада/США), Джеймс Д. Рейст (Канада), Джордж А. Роуз (Канада), Джеф Ванденберге (Нидерланды), Фред Дж. Рона (Канада)

Редакторы:

Роджер Бэрри (США), Роберт Джеффрис (Канада), Джон Стоун (Канада)

Ссылаться на английский оригинал данной главы следует как
(русский перевод является неофициальным)**:**

O.A. Anisimov, D.G. Vaughan, T.V. Callaghan, C. Furgal, H. Marchant, T.D. Prowse, H. Vilhjálsson and J.E. Walsh, 2007: Polar regions (Arctic and Antarctic). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 653-685.

Распространяется бесплатно

Тираж: 1000 экз.

Москва

Содержание

Предисловие редактора перевода 2

Резюме 3

15.1 Введение 4

15.1.1 Обобщение материалов, представленных в Третьем Оценочном докладе (TAR) 4

15.2. Чувствительность/уязвимость современных сообществ и экосистем 5

15.2.1. Состояние климата, окружающей среды и уровня социально-экономического развития ... 5

15.2.2. Уязвимость и возможности адаптации 7

15.3. Происходящие и ожидаемые перемены в полярных регионах 11

15.3.1. Основные региональные последствия и их глобальная значимость 11

15.3.2. Предполагаемые изменения состояния атмосферы 11

15.3.3. Предполагаемые изменения в океанах 12

3.4. Предполагаемые изменения на суше 12

15.4. Ожидаемые воздействия и предполагаемые последствия изменения климата 13

15.4.1. Управление пресноводными системами 13

15.4.2. Наземные экосистемы и их значение для человека 16

15.4.3. Морские экосистемы и их значение для человека в Арктике 19

15.4.4 Морские экосистемы Антарктики и их услуги 20

Врезка 15.1. Атлантическая треска в XX веке: исторические примеры 21

15.4.5. Здоровье и благополучие человека 22

15.4.6. Прибрежная зона и малые острова 23

15.5. Адаптация: практические подходы, варианты и ограничения 24

15.6. Примеры 25

15.6.1. Пример: использование традиционного знания для адаптации 25

15.6.2. Пример: арктические мегадельты 26

15.6.3 Пример: Антарктический полуостров – быстрое потепление в нетронутой окружающей среде 26

15.7. Заключение: следствия для устойчивого развития 27

15.7.1. Экономическая деятельность, инфраструктура и устойчивость в Арктике 27

15.7.2. Экономическая деятельность и устойчивость в Антарктике 28

15.8. Основные неопределенности и приоритеты исследований 29

Список литературы 30

Предисловие редакторов перевода

***В.А. Спиридонов**, к.б.н., Институт океанологии РАН*

***А.О. Кокорин**, к.ф-м.н., WWF России*

Глава 15 отчета Рабочей группы 2 Четвертого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата дает широкий обзор научных данных, неоспоримо свидетельствующих о том, что быстрые изменения климата в конце XX – начале XXI веков и их воздействие на природные системы и общество остро проявляются в полярных регионах и имеют поистине глобальное значение.

Неофициальный перевод главы Четвертого оценочного доклада, посвященной проявлению изменений климата в Арктике и Антарктике, подготовлен Всемирным фондом дикой природы (WWF) в рамках Арктического проекта WWF в помощь экспертам, государственным и общественным организациям.

С одной стороны, подготовка целого раздела Четвертого оценочного доклада по полярным регионам была бы невозможна без масштабной работы российских ученых, внесших вклад (который мог бы быть значительнее) и в другие разделы. Без участия российских специалистов не обходятся крупные международные проекты по моделированию климатических систем и прогнозу будущих изменений. С другой стороны, в академических кругах распространено мнение, что серьезность проблемы изменения климата преувеличена: мы имеем дело с циклическими или квазициклическими процессами, за потеплением наступит похолодание. Наличие циклических и квазициклических процессов неоспоримо, но, как показывает данная глава, в последние 10–20 лет на них накладывается очень сильное воздействие относительно краткосрочного антропогенного усиления парникового эффекта. Особый интерес для России представляет роль арктических регионов как потенциальных значительных источников поступления в атмосферу метана и углекислого газа. Именно этому вопросу посвящен специальный раздел Арктического проекта WWF.

Тем самым роль России и российской науки в решении экологических, экономических и социальных проблем, связанных с изменением климата, становится критически важной. Наша страна занимает наибольшую по сравнению с другими государствами часть Арктического региона и традиционно играла большую роль в исследованиях, использовании морских биологических ресурсов и установлении международного правового режима Антарктики.

Мы надеемся, что предлагаемый вниманию специалистов и всех интересующихся проблемами изменения климата перевод будет способствовать активному вовлечению российских специалистов в работы по анализу влияния изменений климата на экосистемы полярных регионов и разработку вопросов эколого-социальной адаптации к изменению климата в Арктике.

Резюме

В обоих полярных регионах (Арктическом и Антарктическом) наблюдаются очевидные признаки влияния процессов, вызванных изменением климата, на экосистемы и сообщества обитающих там наземных и пресноводных видов – эти изменения прослеживаются *с очень высокой степенью вероятности*. Результаты последних исследований свидетельствуют о том, что *с высокой степенью вероятности* неблагоприятные изменения будут продолжаться, воздействуя на биологические ресурсы и экосистемы. Это приведет (*со средней степенью вероятности*) к глобально значимым последствиям для климата.

Собраны очевидные свидетельства происходящих (*с высокой степенью вероятности*) изменений в распространении и численности обитающих в Арктике живых организмов. В некоторых частях Арктики (*с высокой степенью вероятности*) произошло увеличение площади покрытия фотосинтезирующих растительных сообществ и их биологической продуктивности. В результате сокращения площади покрытых снегом и льдом поверхностей Земли происходит уменьшение отражающей способности подстилающей поверхности. *С высокой степенью вероятности* это приведет к изменению характера обмена парниковыми газами между приполярными растительными сообществами и атмосферой. Хотя результаты недавнего моделирования (*с невысокой степенью вероятности*) предсказывают, что в арктической тундре в XXI веке будет происходить в небольших масштабах связывание углерода, одновременное повышении эмиссии метана в результате таяния многолетней мерзлоты и общее повышение заболоченности в регионе будут увеличивать поглощение солнечной радиации (*эти события предсказываются со средней степенью вероятности*) (см. разделы 4.1., 4.2., 4.7.).*

В обоих полярных регионах (*с очень высокой степенью вероятности*) многолетняя мерзлота и гидрологические процессы будут находиться под сильным воздействием изменения климата. Происходящие перемены будут оказывать возрастающее воздействие на ключевые биологические и физические системы, вместе с этим влияя на глобальный климат. В Арктическом регионе (*с высокой степенью вероятности*) происходящие перемены будут иметь серьезные социальные и экономические последствия.

Увеличение стока пресных вод и льда в полярные моря оказывает прямое воздействие на повышение уровня океана и влияет (в сочетании с таянием морского льда) на стабильность системы термохалинной циркуляции морских вод. В Арктике увеличивается сток евразийских рек, относящихся к бассейну Северного Ледовитого океана, при одновременно продолжающемся сокращении покрова ледников Арктики и Субарктики и ледового щита Гренландии. В некоторых частях Антарктики (*с очень высокой степенью вероятности*) с нарастающей интенсивностью будет продолжаться происходящий в настоящее время процесс сокращения ледникового покрова. *С очень высокой степенью вероятности* ожидается изменение характера процессов в криосфере, влияющих на направление и объем сезонных стоков. Совместное воздействие ожидаемых процессов окажет влияние на системы пресноводных водоемов, речные сети, на береговую зону Арктики (*с высокой степенью вероятности*) и субантарктические острова. Могут проявиться некоторые экономические преимущества происходящих в Арктике процессов (скажем, увеличение потенциала гидроэнергетики), но при этом (*с высокой степенью вероятности*) неблагоприятным воздействиям подвергнутся традиционно обжитые места. *С высокой степенью вероятности* возникнет необходимость в приспособлении системы речного судоходства к условиям сокращающегося ледяного покрова (см. разделы 4.1., 4.6., 7.1.).

Продолжающиеся изменения границы распространения морских льдов, потепление и повышение кислотности вод приполярных морей окажет (*с высокой степенью вероятности*) влияние на биомассу и состав сообществ морской биоты, так же как и на хозяйственную деятельность в Арктике.

Хотя факт заявленного ранее значительного сокращения границы распространения морских льдов в середине XX века сейчас подвергается сомнению, отмеченное недавно сокращение запасов антарктического криля является следствием уменьшения площади распространения антарктических морских льдов; дальнейшее снижение отрицательно скажется на потребителях криля и экосистеме в целом (*с высокой степенью вероятности*). Увеличение кислотности приполярных морей и океанов (*с высокой степенью вероятности*) способно оказать отрицательное воздействие на кальцифицированные организмы, что также, несомненно приведет к смене видового состава морских сообществ.

Влияние изменения климата на рыболовство в Арктике будет различным в разных регионах – с некоторыми преимуществами для одних и потерями для других промыслов.

Сокращение ледового покрова арктических морей сделает их более доступными. При этом усилится волновая нагрузка и произойдут изменения в прибрежных экосистемах и биологической продуктивности, а негативные эффекты для связанной со льдом биоты и продолжающееся сокращение арктических морских льдов обернется для людей как потерями, так и преимуществами (см. разделы 2.1., 2.2., 4.3.).

Население Арктики и местные сообщества уже начали приспосабливаться к последствиям изменения климата, но внешние и внутренние факторы будут продолжать (*с высокой степенью вероятности*) оказывать усиливающееся воздействие на их способность к адаптации. Приносимые процессом изменения климата преимущества (*со средней степенью вероятности*) будут различными в разных регионах и крайне несходными в разных местах.

Влияние последствий происходящих процессов на обеспечение продовольствием и личную безопасность (*с высокой степенью вероятности*) станет основной проблемой в сфере управления возобновляемыми природными ресурсами, так же как и в сфере поддержания традиционно сложившегося образа жизни коренных жителей Арктики (например – в охоте, кочевках и т.д.). Традиционно показываемая представителями коренных народов Севера приспосабливаемость к условиям окружающей среды будет (*с высокой степенью вероятности*) снова проверяться на прочность грядущими переменами.

Потепление и связанное с этим разрушение многолетней мерзлоты (*с очень высокой степенью вероятности*) принесет

* Здесь и далее в резюме имеются в виду разделы главы 15 тома 2 Четвертого оценочного доклада МГЭИК

различные по характеру последствия для коммунальной инфраструктуры Арктического региона. *С высокой степенью вероятности* потребуются значительные инвестиции для приспособления к новым условиям или для перемещения в более безопасные места как существующих поселений, так и имеющейся инфраструктуры.

Преимущества менее тяжелого сценария изменения климата будут зависеть от местных условий. Они могут включать (*со средней степенью вероятности*) следующие позиции:

- сокращение расходов на отопление;
- расширение возможностей сельского хозяйства и лесоводства;
- увеличение продолжительности навигации по Северному морскому пути;
- расширение возможностей доступа к некоторым морским ресурсам (см. разделы 4.6., 5., 7.).

15.1. Введение

В настоящее время значение полярных и приполярных регионов оценивается по следующим критериям:

- геополитическая и экономическая важность;
- крайняя уязвимость к происходящим в настоящее время и ожидаемым в будущем изменениям климата;
- огромный потенциал для влияния на глобальный климат, население Земли и биоразнообразие.

В последние годы как Арктический, так и Антарктический регионы обнаруживали наибольшие уровни проявления признаков глобального потепления. Реальное влияние связанных с изменением климата процессов показывает глубокие региональные различия как внутри полярных регионов, так и между ними – при невероятной сложности этих взаимодействий. Последствия изменения климата в полярных регионах, которые предположительно проявятся в течение ближайших 100 лет, скорее всего, превзойдут прогнозируемые последствия для большинства других регионов и приведут к таким переменам, которые окажут глобальное воздействие. Вместе с этим отмечается, что многогранность возможных реакций на происходящие процессы со стороны биологических и социальных систем при возможности их перекрывания и взаимного усиления делает крайне сложным попытки предсказания возможных последствий.

15.1.1. Обобщение материалов, представленных в Третьем Оценочном докладе (TAR)

В настоящем докладе представлены обновленные и расширенные результаты обсуждения проблем полярных регионов, представленных на Межправительственном Совете по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) Второй рабочей группой (Working Group II) в Третьем оценочном докладе (Third Assessment Report – TAR) (Anisimov et al., 2001). Доклад суммирует климатические изменения, которые наблюдались в полярных регионах в течение более чем 100 последних лет, последствия происходивших перемен для окружающей среды и оценки влияния предполагаемых изменений климата в будущем. Ниже представлены основные результаты оценки и прогноза, к которым применены качественные оценки вероятности: «с высокой степенью вероятности» и «с очень высокой степенью вероятности». Для лучшего представления об упомянутых в докладе местах и географических названиях см. рис. 15.1.

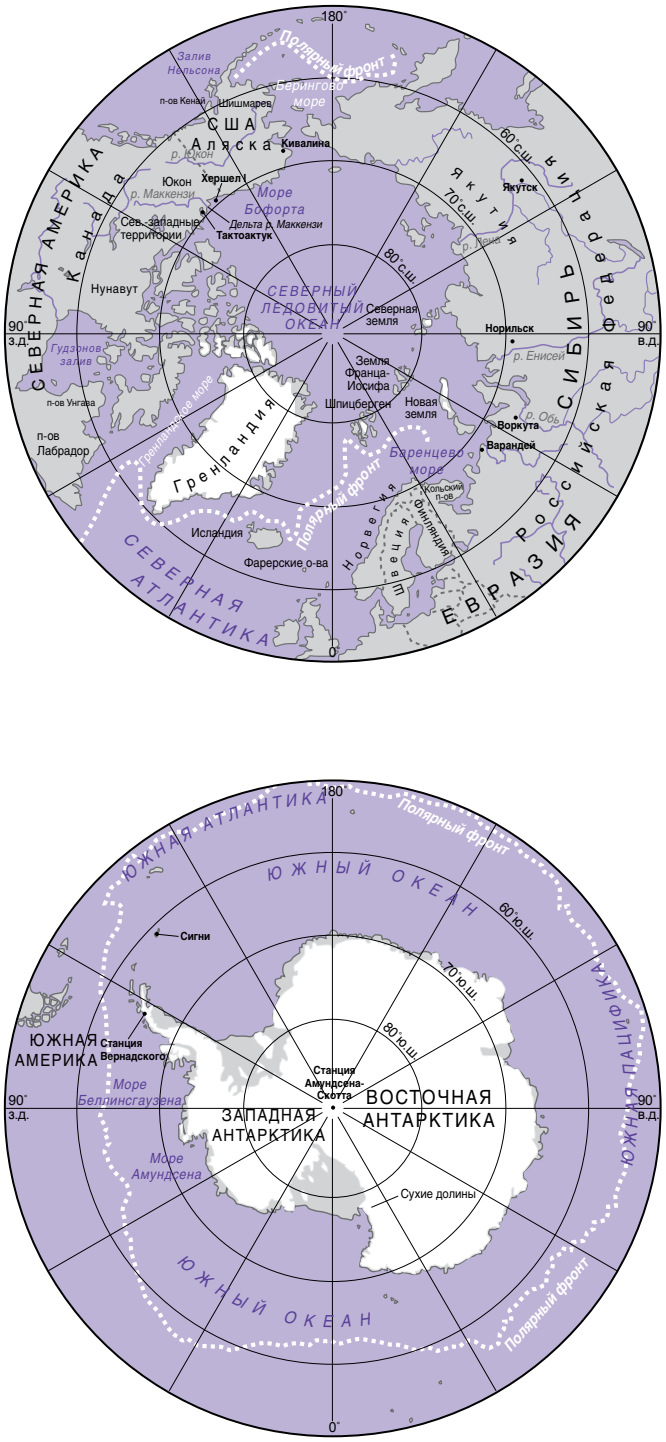


Рисунок 15.1. *Карта регионов Северного и Южного полюсов с указанием названий, встречающихся в тексте. Высоты территорий, покрытых ледниками и свободных от них, показаны с использованием разных цветовых оттенков. Положение полярных фронтов, отражающих распространение холодных полярных вод, показано приблизительно, с учетом их возможного непостоянства (Эта и другие карты составлены P. Fretwell, British Antarctic Survey.)*

Основные тренды, отраженные в TAR

- В течение XX века температуры воздуха над обширными территориями в Арктическом регионе заметно повысились – местами на величину до 5°C. Продолжалось сокращение и исчезновение приполярных льдов. Теплые воды Атлантики все активнее проникали в Северный Ледовитый океан, оказывая отепляющий эффект, в результате чего многолетнее оледенение суши в Евразии сокращалось.
- Во второй половине XX века отмечено потепление на Антарктическом полуострове. В то же время в период с 1973 по 1996 гг. не было отмечено общего значительного изменения границ распространения антарктических льдов.

Основные региональные ожидаемые изменения, отраженные в TAR

- Будет усиливаться процесс таяния ледников Арктики и ледяного щита Гренландии. В то же время ожидается увеличение мощности ледникового покрова Антарктики – в результате предполагаемого увеличения количества осадков.
- Ожидаемое увеличение площади лишенных льда территорий на Антарктическом полуострове приведет к изменению в наземных экосистемах.
- Ожидается значительное сокращение площади морских льдов в полярных районах северного и южного полушария.
- Сокращение многолетней мерзлоты и быстрое расширение лишенных льда поверхностей в Арктике приведет к изменению ландшафтов и повреждению инфраструктуры.
- Изменение климата вместе с ожидаемыми неблагоприятными последствиями этого процесса окажет негативное влияние на жизнь людей в Арктике. Особо пострадают коренные народы Севера, сохраняющие близкий к природе образ жизни.
- Ожидаемые экономические последствия (как положительные, так и отрицательные) будут существенно различаться в разных регионах.

Основные факторы, усиливающие процесс глобального изменения климата, отраженные в TAR

- Изменение отражающей способности (альбедо) подстилающей поверхности в результате сокращения распространения морских льдов и снежного покрова приведет к дополнительному потеплению (нагреванию) подстилающей поверхности и дальнейшему сокращению ледового и снежного покрова.

Обеспокоенность перечисленными проблемами привела к подготовке уникального по детальности Исследования влияния на Арктический климат (Arctic Climate Impact Assessment), посвященного влиянию и последствиям изменения климата в Арктике (ACIA, 2005), материалы которого широко применялись при написании этого доклада. В то же время следует отметить отсутствие столь же детального исследования для Антарктического региона.

15.2. Чувствительность/уязвимость современных сообществ и экосистем

15.2.1. Состояние климата, окружающей среды и уровня социально-экономического развития

Арктика

В течение нескольких последних десятилетий температура приповерхностного слоя атмосферы в Арктике повышалась примерно в два раза быстрее по сравнению с глобальным уровнем потепления (McBean et al., 2005). Среднее повышение температуры в области, расположенной севернее 60° с.ш., составило 1-2°C после минимума, отмеченного в 60-х и 70-х годах XX века. В морях Арктики измерения температуры в XX веке показывают устойчивые низкочастотные колебания продолжительностью в несколько десятилетий (Polyakov et al., 2002).

В опубликованной в 2006 г. работе Серрез и Франсис (Serreze, Francis, 2006) обсуждают соответствие происходящих перемен типичным естественным процессам (природной вариабельности) и возможностям антропогенного ускорения процессов. Они считают, что Арктический регион находится на начальном этапе перемен, порождаемых значительным поступлением в атмосферу парниковых газов антропогенного происхождения. Такое заключение основывается на довольно низком уровне проявления влияния парниковых газов в моделях, описывающих природные процессы в XX и начале XXI века.

Недавнее потепление в Арктике, являющееся одним из наиболее значительных за период наблюдений и относящееся к 80-м годам XX века, составляет примерно 1°C в десятилетие, проявляясь в зимне-весенний период и оставаясь практически незаметным в осенний период. Его проявления особенно заметны на территории северной части Евразии (преимущественно в азиатской части) и северо-западной части Северной Америки (McBean et al., 2005). В этих регионах, так же как и на Антарктическом полуострове, в течение последних нескольких десятилетий особенно активно – в сравнении с другими регионами планеты – проявляются признаки потепления (Turner et al., 2007). В то же время североатлантические приполярные моря показывают лишь незначительное потепление за тот же период. По всей видимости, это связано с влиянием поднимающихся с глубины холодных вод. Температура верхних слоев тропосферы и стратосферы в Арктике в течение последних десятилетий (начиная с 1979 г.) понижалась – вслед за повышением содержания парниковых газов и снижением концентрации озона в стратосфере (Weatherhead et al., 2005).

Имеются данные относительно происходившего в течение последних 100 лет увеличения количества осадков в Арктике; вместе с тем специалисты отмечают, что уровень прироста осадков крайне мал (составляя около 1% за десятилетие), это увеличение весьма непостоянно в пространстве и недостаточно определенно подтверждается в силу слабой развитости сети наблюдения за осадками (McBean et al., 2005) и трудностями измерений количества осадков в ветреную погоду, характерную для арктического региона. Пока нет определенных свидетельств относительно увеличения количества и силы штормов в Арктике

(Atkinson, 2005), в то же время уязвимость береговой линии к штормам увеличивается по мере отступления границы распространения морских льдов (см. раздел 15.4.7.). Недостаточны данные по средним величинам осадков в Гренландии. Начиная с 30-х годов XX века вслед за изменениями температурного режима и крупномасштабной атмосферной циркуляции отмечается увеличение стока евразийских рек бассейна Северного Ледовитого океана (Peterson et al., 2002).

Сокращение территории распространения ледников на суше и морских льдов в Арктике (Lemke et al., 2007), сокращение периода стояния льда на реках и озерах на территории практически всей Субарктики (Prowse et al., 2004; Walsh et al., 2005), начавшееся в 80-х годах XX века таяние многолетней мерзлоты практически во всех местах проведения наблюдений (Romanovsky et al., 2002; Walsh et al., 2005) – все эти объективно наблюдаемые процессы следуют за процессом повышения температуры приповерхностной атмосферы в Арктике. Вместе с имеющимися очевидными свидетельствами разрушения многолетней мерзлоты (Lemke et al., 2007), пока явно недостаточно данных продолжительных наблюдений и инструментальных измерений, показывающих масштабы расширения «активного» слоя (поверхности суши с низкой отражательной способностью).

Изменения в составе растительных сообществ – особенно заметные в районах превращения занятых травой луговых территорий в заросли кустарников – отмечаются в североамериканском секторе Арктики (Sturm et al., 2001) и других местах (Tape et al., 2006). Получаемые со спутников изображения земной поверхности Арктического региона показывают увеличение усредненного индекса растительного покрова (Normalised Difference Vegetation Index), определяющего фотосинтетическую активность биомассы (Slayback et al., 2003). Как отмечается в TAR, это связано с увеличением вегетационного периода и с документально подтвержденными изменениями содержания CO_2 в атмосфере. Обобщенное влияние изменения климата на экосистемы в обоих полярных регионах рассматривается в работе Walther et al. (2002). Эти процессы получили широкое документальное подтверждение для Арктического региона в Исследовании влияния на арктический климат (Arctic Climate Impact Assessment – ACIA, 2005).

Последний анализ данных дистанционного зондирования (Krabill et al., 2004), спутниковой информации (Howat et al., 2005; Luckman et al., 2006; Rignot, Kanagaratnam, 2006) и данных сейсмического анализа (Ekstrom et al., 2006) указывает на истончение краев ледникового панциря Гренландии – в тех местах, где летнее таяние увеличилось в течение последних двадцати лет (Abdalati and Steffen, 2001; Walsh et al., 2005). В то же время есть свидетельства, что в центральной части Гренландии эти процессы идут еще быстрее (Johannessen et al., 2005).

В настоящее время население Арктического региона составляет около 4 млн человек (Bogoyavlenskiy and Siggner, 2004). Миграционные процессы в XX веке привели к значительным переменам в демографическом составе населения Арктики, в результате чего коренные жители составляют не более 10% численности населения. Все это стало причиной серьезных социальных, культурных и экономических сдвигов в укладе и образе жизни северных народов (Huntington, 1992; Nuttall, 2000b). Для большинства стран Арктического региона (имеются в виду страны, территория которых частично или полностью располагается в пределах Арктического региона) характерен тот факт, что лишь незначительная часть их общего населения обитает в малочисленных северных поселках (Bogoyavlenskiy and Siggner, 2004). В то же время значительная часть населения Севера сохраняет кочевой образ жизни. Примерно 65% населения региона живет в населенных пунктах с численностью более 5 тыс. жителей.

Отмечается тот факт, что в большинстве случаев попытки перевести северные народы на оседлый образ жизни оказали разрушительное влияние на традиционный образ жизни их сообществ. В то же время жители Арктики получили возможность пользоваться некоторыми «благами цивилизации» – использовать централизованное водоснабжение, собирать и перерабатывать бытовые отходы и сточные воды, получать медицинскую помощь и пользоваться транспортной инфраструктурой (Hild and Stordhal, 2004). В целом отмечается, что население Арктики достаточно молодо, имеет более высокий уровень рождаемости (по сравнению со средними уровнями на территориях, лежащих за пределами региона), но при этом более низкую продолжительность жизни. Это в первую очередь относится к коренным народам Севера. Исключение составляет Россия, где численность населения Арктического региона и продолжительность жизни сокращаются начиная с 90-х годов XX века (Einarsson et al., 2004).

Несмотря на малую численность и плотность населения, Арктика приобретает все большее значение в мировой политике и экономике. Например, разрушительные последствия для здоровья жителей Арктики загрязняющих веществ, производимых в других регионах мира, привели к необходимости заключения международных соглашений (например, Стокгольмской конвенции по стойким органическим загрязнителям – Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants) (Downey and Fenge, 2003). Более того, наличие огромных запасов нефти, природного газа и минеральных ресурсов (например, алмазов) подразумевает дальнейшее развитие хозяйственной деятельности в северном циркумполярном регионе – что будет и далее повышать его роль в международном развитии (напр., U.S. Geological Survey World Energy Assessment Team, 2000; Laherre, 2001).

Антарктика

Прямые инструментальные измерения дают представление о пространственной неоднородности изменения температурного режима в Антарктике. Скажем, все расположенные на Антарктическом полуострове метеостанции показывают заметное устойчивое повышение средних температур в течение последних 50 лет (см. раздел 15.6.3.). В то же время анализ ежегодных долгосрочных наблюдений за погодой (на протяжении более 30 лет) показывает, что из них 12 лет были теплее средних значений; 7 лет были холоднее средних значений; при этом только два года – по одному в каждой группе – показали значительные отклонения (более чем на 10%) от средних многолетних значений (Turner et al., 2005). Если регистрацию температуры на отдельных станциях рассматривать как результаты независимых измерений, можно сделать вывод об их соответствии глобальному тренду на потепление (Vaughan et al., 2003); в то же время пока нет подтвержденных свидетельств об «об-

щеантарктическом» повышении температуры. В тех частях Антарктиды, где наблюдается некоторое похолодание (например, в районе станции «Амундсен – Скотт» на Южном полюсе), не обнаружено прямых масштабных последствий происходящих перемен, но имеются некоторые локальные последствия. Например, в районе Сухих Долин (Dry Valleys) на 6-9% сократилась первичная продуктивность озер; и более чем на 10% в год сокращается численность почвенных беспозвоночных (Doran et al., 2002). Другие последствия менее очевидны – скажем, уменьшение количества осадков на субантарктических островах (Bergstrom and Chown, 1999).

Отмеченное недавно увеличение площади распространения антарктических плавучих льдов детально обсуждается в других работах (Lemke et al.,), но приводимые в TAR данные (Anisimov et al., 2001), отобранные из наблюдений за ледовой обстановкой во времена китобойного промысла (de la Mare, 1997), более не считаются достоверными (Ackley et al., 2003). Отмечаемые на спутниковых изображениях изменения в распространении морских льдов имеют региональные различия. Например, в море Росса происходит увеличение, а в морях Беллинсгаузена и Амундсена – сокращение распространения морских льдов (*с высокой вероятностью*) (Parkinson, 2002; Zwally et al., 2002). Характер изменения ледового режима отражает тренды в изменении температуры приземного слоя атмосферы, которые четко фиксируются расположенными неподалеку метеорологическими станциями (Vaughan et al., 2003).

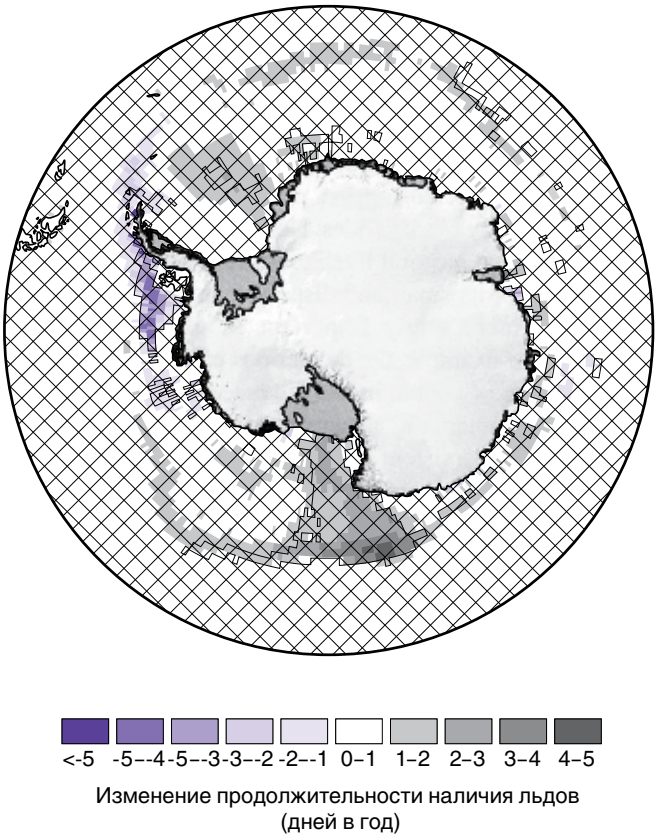


Рисунок 15.2. *Изменения продолжительности наличия антарктических плавучих льдов (дней в году) для периода с 1978 по 2004 гг. (по Parkinson, 2002). Серыми тонами показаны участки с увеличением на указанное количество дней продолжительности распространения плавучих льдов; синими тонами показаны участки с уменьшением на указанное количество дней продолжительности распространения плавучих льдов (данные взяты из W.M. Connolley, British Antarctic Survey).*

Рост концентрации CO_2 в атмосфере ведет к возрастанию запасания углекислоты морями и океанами, что увеличивает кислотность их вод, происходит т.н. ацидификация Мирового океана (Royal Society, 2005). В Южном океане важным компонентом пелагических микробиологических сообществ являются представители отрядов кокколитофорид и фораминифер, активно участвующие в связывании CO_2 и захоронении углерода в морских осадках. Недавние исследования показывают, что при существующих темпах снижения pH вод Южного океана морские пелагические моллюски птероподы утратят привычную для них среду обитания к 2100 г. Их вымирание будет иметь серьезные последствия, поскольку в результате из пищевой цепи выпадет важный элемент (Orr et al., 2005). Ацидификация подвергает угрозе и холодноводные кораллы. Подводя итог, можно сказать, что уменьшение pH морской воды приведет к изменениям в происходящих химических процессах, что повлияет на доступность биогенов и сократит возможность океана абсорбировать углекислоту из атмосферы (Глава 4, Royal Society, 2005).

15.2.2. Уязвимость и возможности адаптации

Уязвимость (vulnerability) – степень устойчивости системы, ее возможность противостоять неблагоприятным воздействиям, возможность адаптации и устойчивости, способность к саморегуляции в неблагоприятных условиях, способность справляться с неблагоприятными последствиями (McCarthy et al., 2005).

15.2.2.1. Наземные и морские экосистемы

Многие виды из числа населяющих полярные и приполярные регионы отличаются особой уязвимостью к последствиям изменения климата, поскольку они адаптированы к обитанию в жестких условиях низких температур и ограниченности солнечного света. Это делает их уязвимыми при конкурентных отношениях с потенциальными мигрантами из регионов с более мягкими условиями среды обитания (Callaghan et al., 2005; Peck et al., 2006). Другие виды требуют особых условий обитания, например, зимнего снежного покрова или определенного времени, когда пища легко доступна (Mehlum, 1999; Peck et al., 2006). В довершение всего многие виды подвергаются множественному антропогенному стрессу (включая увеличивающуюся дозу получаемого B-ультрафиолетового излучения, воздействие загрязняющих веществ, переживают потерю и фрагментацию местообитаний), и эти факторы будут действовать в сочетании с изменением климата (Walther et al., 2002; McCarthy et al., 2005). Растения и животные в полярных районах уязвимы к воздействию вредителей (Juday et al., 2005) и паразитов (Albon et al., 2002; Kutz et al., 2002), которые быстрее развиваются и размножаются в более теплых и влажных условиях. Многие наземные полярные экосистемы уязвимы потому, что видовое богатство в целом низко и возможности дублирования на определенных уровнях пищевой цепи и в пределах групп видов, выполняющих определенную функцию в экосистеме, ограничены (Matveyeva, Chernov, 2000). Потеря же ключевых видов (например, леммингов (Turchin, Batzli, 2001) способна вызвать каскадный эффект гибели всей экосистемы.

Арктика

В арктических экосистемах для разных представителей адаптивная способность неодинакова – размножающиеся вегетативным способом растения имеют достаточно низкую способность приспособления к изменяющимся условиям окружающей среды; жизненный цикл насекомых обладает более высокой адаптивностью (напр., Strathdee et al., 1993); микроорганизмы имеют очень высокий потенциал приспособления за счет быстрого размножения и широкого распространения. В целом можно сказать, что адаптивная способность представленных в настоящее время в Арктике экосистем достаточно низкая. Возможности их расширения крайне ограничены «зажатостью» между расширяющимися северными лесами, существующей береговой линией и постепенным затоплением северных прибрежных болот из-за подъема уровня океана. Дополнительным ограничением служит расширяющееся землепользование (см. рис. 15.3.). Общая уязвимость к потеплению и недостаточная возможность приспособления арктических видов и экосистем вызовет скорее их перемещение или гибель, чем к адаптацию к изменившемуся климату (см. рис. 15.3.).

По мере увеличения температуры воздуха и морской воды в Беринговом море будут происходить изменения границ распространения морских льдов, стратификации вод, первичной продуктивности и осадконакопления (Grebmeier et al., 2006). Изменение условий от арктических к субарктическим, сдвигающее в северном направлении морские экосистемы с доминированием пелагических компонентов, было ранее обнаружено в юго-восточной части Берингова моря. Сообщества, включающие такие организмы, как питающиеся донными организмами птицы, сменяются сообществами с доминированием пелагических рыб. Изменение ледовых условий также оказывает существенное влияние на промышленное и поддерживающее рыболовство (Grebmeier et al., 2006).

Многие моря Арктики и Субарктики (в том числе части Берингова и Баренцева морей) являются наиболее продуктивными регионами в мире (Sakshaug, 2003): они дают около 7 млн т вылова рыбы в год и доход до 15 млрд. долл. США в год (Vilhjálmsson et al., 2005), обеспечивая работой от 600 тыс. до 1 млн человек в год (Agnarsson and Arnason, 2003). Кроме всего перечисленного, арктические морские

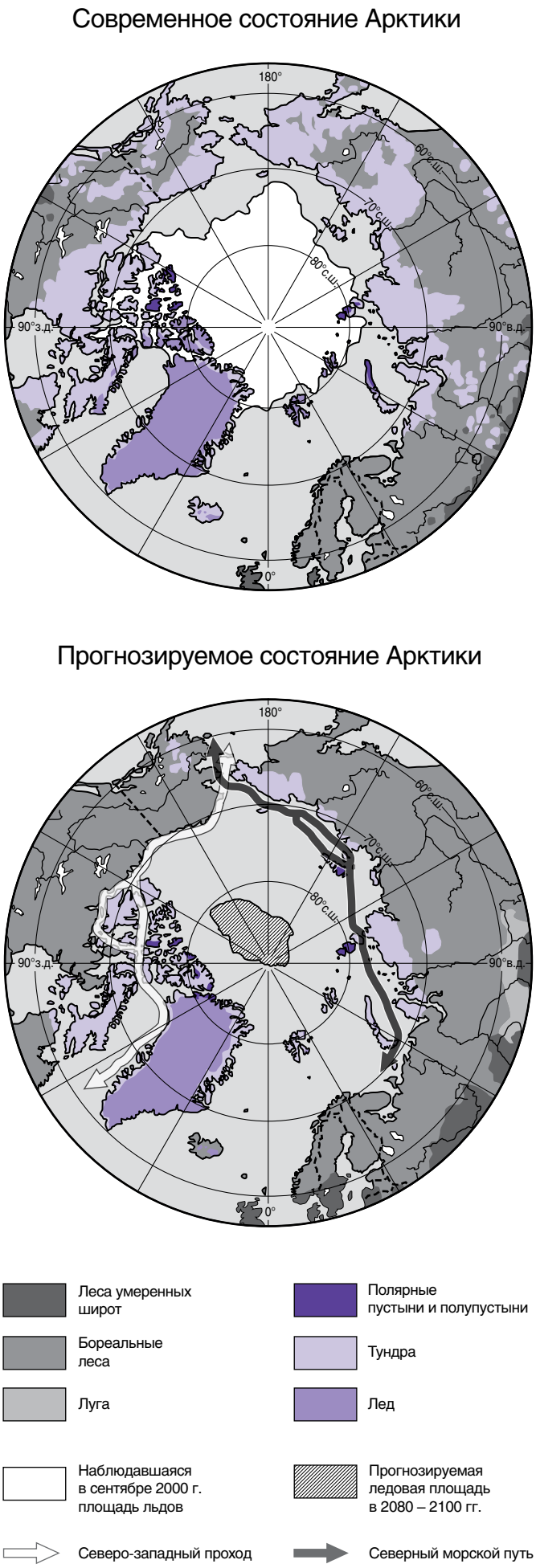


Рисунок 15.3. *Современный и предполагаемый на конец XXI века растительный покров и минимальное распространение морских льдов в Арктике и прилегающих регионах. Карты растительности базируются на современных наблюдениях (верхняя карта) и предполагаемом распространении растительности на период 2090 – 2100 гг. (нижняя карта). Карта составлена при помощи климатической модели HadCM2 (Kaplan et al., 2003; Callaghan et al., 2005). Типы растительности сгруппированы следующим образом: леса умеренных широт (temperate forest) – это широколиственные, смешанные и хвойные леса умеренных и южной границы северных широт; хвойные (бореальные) леса (boreal forest) – это хвойные леса северных широт; луговая растительность (grassland) – это разнотравье, ксерофиты, кустарники; тундра (tundra) – это средне- и низкорослые (карликовые) кустарники; полярные пустыни/полупустыни (polar desert/semi-desert) – это стелющиеся кустарники, мхи и лишайники. Также показано наблюдавшееся в сентябре 2002 г. распространение льдов и предполагаемое на конец XXI века распространение льдов вместе с потенциальными новыми/изменившимися морскими путями. (Источники: Instanes et al., 2005; and, Walsh et al., 2005)*

экосистемы важны для поддержания традиционного образа жизни коренных народов и жителей сельских поселений (Vilhjálmsson et al., 2005).

Недавние исследования показывают, что потепление поверхностных слоев вод северо-восточной Атлантики сопровождается увеличением численности наиболее крупных видов, составляющих фитопланктон в холодных регионах, при одновременном сокращении их представительства в более теплых регионах (Richardson, Schoeman, 2004). Кроме того, сезонные циклы активности морских микроорганизмов и беспозвоночных, так же как и различия в отклике пелагических сообществ на изменения, приводят к тому, что циклы хищников и жертв начинают расходиться. Продолжающееся потепление будет оказывать все большее воздействие на состав и численность как первичных, так и вторичных звеньев пищевых цепей, угнетая активность и сокращая численность верхних уровней трофической пирамиды (хищников). Это окажет влияние на экономически важные виды морских обитателей – рыб и зависящих от них хищников, таких как морские млекопитающие и птицы (Edwards and Richardson, 2004).

Антарктика

Имеются свидетельства значительных изменений в экосистемах, испытывающих потепление приматериковых и открытых морей Антарктического региона. На мелководье увеличивается обилие губок и живущих за их счет потребителей. При этом сокращается количество криля, пингвинов (Адели и императорских), тюленей (Ainley et al., 2005). Только два вида цветковых растений встречаются в настоящее время в небольших и изолированных друг от друга свободных ото льда участках на антарктическом континенте – Antarctic pearlwort (*Colobanthus quitensis*) и Antarctic hair grass (*Deschampsia antarctica*). Увеличение их численности и расширение ареала объясняется повышенными летними температурами (Fowbert and Smith, 1994). В континентальной части Антарктики изменение климата оказывает влияние также на растительность, преимущественно представленную водорослями, лишайниками и мхами. Предполагается, что дальнейшие изменения в экосистемах будут происходить в результате повышения температур и увеличения доступности биогенов (Robinson et al., 2003).

Отмечаемое сокращение биомассы антарктического криля (*Euphausia superba*) и увеличение биомассы пелагических туникат – сальп (особенно *Salpa thompsoni*) может быть связано с изменением ледовых условий (Atkinson et al., 2004). Эти перемены также могут лежать в основе происшедших в юго-западной Атлантике в конце XX века изменений в демографии видов, питающихся крилем, – морских млекопитающих и птиц (Fraser, Hoffmann, 2003), и эта связь указывает на потенциальную уязвимость их к изменению климата, важность которой пока не может быть определена.

Современные исследования на субантарктических островах показывают увеличение численности занесенных видов и их отрицательное воздействие на локальную биоту, в частности на количество и размеры моховых (образованных *Sphagnum*) пустошей (Whinam, Copson, 2006). На этих островах расширяющаяся деятельность человека и увеличивающиеся температуры совместно способствуют инвазии чужеродных видов (Bergstrom, Chown, 1999).

15.2.2.2. Пресноводные системы

Арктика

Климатическая вариабельность – изменения климата оказывали, оказывают и будут оказывать влияние на арктические пресноводные системы. Воздействия первого порядка (такие как изменение режима и количества осадков в виде снега, льда и воды) играют важнейшую роль в глобальных климатических процессах. В результате этого изменяется отражающая способность подстилающей поверхности; нарушается стабильность стратификации водной толщи и циркуляции вод и выход в атмосферу метана. Каскадное усиление последствий оказывает огромное влияние на пресноводные системы, меняя их экологическую и ресурсную значимость.

С точки зрения экологов степень уязвимости по отношению к многим воздействиям высшего порядка (таким как изменения в геохимии вод, доступности и качестве местообитаний, биологическом разнообразии) связана с постепенностью/резкостью переходов, например, связанных с изменением ледового покрова пресноводных водоемов или сопряженных биохимических откликов (в частности, уменьшения содержания растворенного кислорода в воде, связанного с продуктивностью озер) (Wrona et al., 2005). Исторически арктические пресноводные системы оказались приспособлены к высокой изменчивости климатических изменений (см. Ruhland, Smol, 2002; Ruhland et al., 2003), но в течение грядущего столетия сочетание пространственного масштаба и стремительности процессов может превысить возможности адаптации биоты в целом и сложившихся на ее основе экосистем (Wrona et al., 2006a). Предстоящие радикальные перемены будут иметь как позитивные, так и негативные последствия. Согласно мнению специалистов, негативные последствия с высокой степенью вероятности превысят позитивные, усиливая уязвимость пресноводных систем к изменениям климата (Wrona et al., 2005).

С точки зрения изменений в характере хозяйственной деятельности последствия могут оказаться крайне разнообразными. Скажем, придется менять практику наведения зимних дорог, развивать транспортировку по открытой воде или, напротив, наземные средства транспорта для того, чтобы избежать опасностей, связанных с неустойчивым льдом, регулировать расход воды для гидроэнергетики в зависимости от меняющегося стока рек, менять стратегию водоснабжения и доступа к питьевой воде, разрабатывать меры защиты от наводнений и других стихийных бедствий, связанных с пресноводными водоемами или, напротив, стратегию использования наводнений для водосбережения (Prowse, Beltaos, 2002). Трудности в достижении стратегий адаптации могут быть наибольшими там, где традиционное использование ресурсов пресных вод имеет значительную культурную и социальную значимость (McBean et al., 2005; Nutall et al., 2005).

Антарктика

Пресноводные системы Антарктического региона меньше по размерам и не столь многочисленны, как в Арктике, но они не менее уязвимы для последствий изменения климата. Микробные сообщества, населяющие эти системы, с высокой вероятностью изменятся вследствие изменения циклов биогенов, поступления загрязнителей и интродукции видов, лучше приспособленных

для существования в меняющихся условиях. Уменьшение температуры воздуха на 0.7°C за десятилетие в конце XX века привело к 6-9%-ному падению первичной продуктивности (Doran et al., 2002). По контрасту с этим летняя температура воздуха на субантарктическом о-ве Сигни увеличилась на 1°C за последние 50 лет, а температура воды в озерах в период с 1980 по 1995 гг. росла в несколько раз быстрее, чем температура воздуха; это один из наиболее быстрых откликов на региональном уровне, документированных для Южного полушприя (Quayle et al., 2002). Как следствие, годовой безледный период увеличился на 4 недели. Кроме этого, область, постоянно покрытая снегом, сократилась на о. Сигни с 1951 г. на 45% и связанные с этим изменения в микробных и геохимических процессах привели к увеличению стока органических и неорганических биогенов, попадающих в озеро. Сокращение снежного покрова и увеличение площади участков, пригодных для отдыха и линьки, привело к стремительному росту популяции южных морских котиков (Arctocephalus gazella) на прилегающих островах. Все эти изменения ведут к нарушению функционирования сложившихся экосистем, связанных с увеличением притока биогенов (эвтрофикацией) (Quayle et al., 2002). Сходные экологические нарушения можно ожидать и в других антарктических пресноводных системах.

15.2.2.3. Многолетняя мерзлота

Многолетней мерзлотой называют приповерхностные грунты, имеющие температуру 0°C и ниже, сохраняющиеся в течение двух или более лет, распространенные в Арктике, Субарктике, высокогорных регионах и некоторых незначительных по площади, лишенных постоянного ледового покрова частях Антарктиды.

Физические процессы взаимодействия климата и мерзлоты и наблюдения за изменениями многолетнемерзлого слоя обсуждаются в других работах (Lemke et al., 2007), здесь мы в первую очередь рассматриваем наблюдаемые и прогнозируемые изменения мерзлоты и то воздействие, которое они могут оказать на природные и социальные системы.

Данные наблюдений за многолетней мерзлотой весьма ограничены, однако точные замеры в специализированных скважинах указывают на тот факт, что температура мерзлых грунтов в Арктике заметно повысилась за последние 50 лет (Romanovsky et al., 2002), быстрое потепление происходило на Аляске (Hinzman et al., 2005), в Канаде (Beilman et al., 2001), в Европе (Harris et al., 2003) и в Сибири (Pavlov, Moskalenko, 2002). Краткосрочные локальные проявления потепления, связанные с сокращением снежного покрова (Stieglitz et al., 2003), и последствия увеличившейся продуктивности растительных сообществ (Sturm et al., 2001; Anisimov, Belolutskaia, 2004; Chapin III et al., 2005b) являются при этом важными соображениями, которые следует принять во внимание.

В контексте ожидаемого изменения климата существуют два повода для беспокойства в связи с таянием многолетней мерзлоты: воздействие на инфраструктуру, построенную на мерзлых грунтах, и обратная связь с глобальной системой климата путем потенциальной эмиссии парниковых газов.

Более детально эти проблемы обсуждаются в разделах 15.7.1. и 15.4.2.3.

15.2.2.4. Население

Антарктида и прилегающие к ней субантарктические острова не имеют постоянного населения. Там находятся только сменяющийся персонал научно-исследовательских станций и сезонные (летние) посетители. В то же время в Антарктическом регионе есть несколько мест с особо уязвимыми ландшафтами и экосистемами, в которых изменение климата может вынудить оставить обжитые места (см. раздел 15.6.3.), однако в глобальной перспективе это может рассматриваться как логистическая проблема для задействованных организаций.

В противоположность Антарктике археологические данные свидетельствуют о том, что в Арктике люди жили не одно тысячелетие (Pavlov et al., 2001). В прошлом обитатели Арктики в основном практиковали сезонное перемещение между поселениями и/или сезонную смену видов деятельности (сельское хозяйство на рыболовство) и кочевой или полукочевой образ жизни с перемещением за охотничьими животными или стадами оленей.

Сейчас большинство постоянных жителей региона ведет оседлый образ жизни, обитая в постоянных поселениях – преимущественно располагающихся на узкой прибрежной полосе. Несмотря на происходящие перемены в социальной и экономической жизни, многие обитатели арктических поселков до настоящего времени связаны в своей повседневной хозяйственной деятельности с природой (морем и сушей), а местные экономики представляют собой комбинацию жизнеобеспечивающих и товаро-денежных отношений, которые в некоторых случаях связаны с разработкой минерального, углеводородного сырья и других ресурсов (Duhaime, 2004). Поселения коренных народов Севера, преимущественно располагающиеся в приморской полосе, особо уязвимы для любых последствий изменения климата. Это связано со спецификой использования земли, традиционным образом жизни, особенностями питания и местной экономики, культурной и социальной жизнью. Любые изменения в регионе нанесут серьезный ущерб этим хрупким социальным группам.

Отчасти жители северных поселений уже адаптировались к изменяющимся условиям окружающей среды (Krupnik, Jolly, 2002; Nickels et al., 2002) – как за счет изменения системы природопользования, так и за счет изменения собственного поведения (например, изменения сезонной приуроченности и локализации определенных видов деятельности) – и сохраняют значительную способность к адаптации. Эта способность связана с гибкостью экономической организации, детальным местным знанием и навыками, взаимовыручкой и горизонтальными социальными связями, которые обеспечивают своевременную поддержку (Berkes, Jolly, 2001). В то же время для некоторых арктических народов переход к оседлости вместе с изменением повседневного образа жизни и утратой части культуры снижает возможности адаптации, поскольку оседлый образ жизни и большее участие в экономической деятельности и получении доходов уменьшают число людей, способных добывать пропитание традиционным образом в местных условиях. Сколь устойчивой окажется такая тенденция, предсказать трудно.

Небольшие арктические сообщества, хотя и находящиеся в удаленных местах, политически, экономически и социально тесно связаны с основными процессами, происходящими на национальном уровне, а также испытывают

влияние глобальной экономической коньюнктуры (Nutall et al., 2005). Сегодня торговые барьеры, режимы управления ресурсами, законодательство, политические и природоохранные интересы, равно как и то, что называют глобализацией, – все затрагивает, ограничивает или снижает способность арктических сообществ адаптироваться к глобальным изменениями (Nutall et al., 2005). Тренды модернизации в этих сообществах также оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на способности к адаптации. Увеличивающийся доступ к внешнему рынку и новые технологии улучшают возможности разрабатывать ресурсы и укрепляют основы местной экономики, однако, большее время, затрачиваемое на работу по найму, хотя и дает заметные преимущества для отдельных людей и домохозяйств через увеличение экономической состоятельности, уменьшает при этом возможность, живя на земле, оценивать происходящие изменения и вырабатывать знание, увеличивающее адаптивные возможности. Это приводит к недооценке того обстоятельства, что изменения климата – это одна из связанных между собой проблем существования арктических сообществ и их образа жизни в наши дни (Chapin et al., 2005a).

В некоторых случаях коренные народы могут рассматривать адаптационные стратегии как неприемлемые, поскольку они затрагивают критические аспекты традиций и культур. Так, например, Циркумполярная Конференция иннуитов представила вопрос изменения климата в письме в Сенат Соединенных Штатов как нарушение прав человека, поскольку он ограничивает удовлетворение базовых потребностей, как они понимаются инуитами, и ведет к утрате культуры и идентичности (Watt-Cloutier, 2004). В настоящее время мы не знаем пределов адаптивных способностей населения Арктики, равно как и последствий применения некоторых адаптивных мер.

15.3. Происходящие и ожидаемые перемены в полярных регионах

15.3.1. Основные региональные последствия и их глобальная значимость

Предположительно, изменение климата в полярных регионах будет иметь много прямых последствий – как региональных, так и глобальных, – которые проявятся посредством следующих процессов и обратных связей:

- ***Изменится отражающая способность снега, льда и растительного покрова:*** отражающая способность снега, льда и растительного покрова играет определяющую роль в формировании глобального климата за счет альбедо (отражения) и поглощения приходящего на землю солнечного излучения разными типами подстилающей поверхности. Поскольку в TAR определенно говорится о появившихся свидетельствах сокращения снежного и ледового покрова в некоторых регионах Сибири, Аляски и Гренландского моря, есть основания полагать, что связанное с этим изменение альбедо может привести к климатическим изменениям (напр., Holland , Bitz, 2003).
- ***Произойдет сокращение ледников в горах и ледяного покрова суши, изменение речного стока, повышение уровня океанов и изменение циркуляции в морях и океанах:*** сокращение ледников в Арктике и ускорение таяния краев ледяного панциря Гренландии (см. раздел 15.2.1.) вместе с наблюдаемым увеличением речного стока в регионе (Peterson et al., 2002) являются важнейшим фактором, влияющим на объемы поступления пресных вод (freshwater budget) в Северный Ледовитый океан. Развитие данных процессов может оказать влияние на глобальную систему океанических течений (Lemke et al., 2007).
- ***Проявится нестабильность/неопределенность углеродного круговорота в Арктике:*** результаты моделирования показывают, что наземные экосистемы и активная подстилающая поверхность в Арктике будет играть небольшую роль как резервуар углерода, процессы прогнозируются с высокой степенью неопределенности. Возможно, что увеличение эмиссии углерода, освобождающегося в процессе таяния многолетней мерзлоты, приведет к усилению процесса изменения климата (Sitch et al., 2007). Важно, в каком виде углерод будет попадать в атмосферу – в виде двуокиси углерода (CO_2) или в виде метана (CH_4), поскольку на молекулярном уровне активность метана в процессе влияния на климат в 20 раз выше по сравнению с двуокисью углерода (Anisimov et al., 2005b).
- ***Изменится характер миграции живых организмов:*** виды животных и птиц, ежегодно мигрирующие на летний сезон из более низких (умеренных) широт в приполярные регионы, находятся в зависимости от специфических существующих в полярных широтах условий. Изменение этих условий окажет воздействие на сложившиеся сообщества живых организмов и пищевые цепи далеко за пределами полярных регионов. Местообитания сезонно мигрирующих видов могут подвергнуться прямому влиянию изменения климата – например, за счет пересыхания водоемов и заболоченных территорий, изменения в землепользовании, режиме охоты, рыболовстве и т.д.
- ***Судьба гидратов метана:*** значительное количество гидратов метана содержатся в осадочных породах – особенно в зоне арктического континентального шельфа. В случае потепления эти запасы метана и других парниковых газов могут поступить в атмосферу, усилив процесс изменения климата (Sloan Jr, 2003; Maslin, 2004).
- ***Проявится нестабильность/неопределенность круговорота углерода в Южном океане:*** климатические модели показывают, что глубинная стратификация вод Южного океана будет меняться. Это может привести к изменению структуры основных первичных продуцентов, что повлияет на уровень и объем связывания (запасания) атмосферного углерода в океанах.

15.3.2. Предполагаемые изменения состояния атмосферы

Согласно имеющимся оценкам, к 2100 г. усредненные уровни потепления в Арктике составят от 2° до 9°C – в зависимости от применяемой модели и рассматриваемого сценария. Наибольшее проявление предполагаемого потепления ожидается в осенне-зимний сезон над лишенными льда областями приполярных океанов. Над территорией суши ожидаются меньшие сезонные колебания проявлений потепления. Хотя для некоторых территорий (скажем, Канадского Арктического архипелага) ожидаемые процессы не столь определенны.

В противоположность ситуации в Арктике, где большинство моделей предсказывают усиление процесса потепления, ситуация в Антарктике разными моделями прогнозируется по-разному – особенно над материковой частью (Parkinson, 2004). Тем не менее ряд моделей показывают, что ожидается усиление потепления на окраинной части Южного океана – в зоне сокращения распространения плавучих льдов.

В течение XXI века ожидается глобальное увеличение количества осадков на 10-20% (согласно сценарию выбросов парниковых газов SRES A1B IPCC Четвертого оценочного доклада). При этом сезонность и пространственное распространение осадков в результатах различных моделей варьирует. Сходный результат получен другими работами по имитационному моделированию в рамках Четвертого оценочного доклада (Kattsov et al., 2007). Пропорция снега и дождя в выпадающих осадках в результате потепления климата также изменится. Это повлияет на гидрологический режим поверхностных водотоков, наземные экосистемы и структуру снежного покрова. Доля дождя по отношению к доле снега особенно увеличится в тех регионах Субарктики и в те сезоны, когда температура атмосферы приближается к точке замерзания (0°C). Разница между количеством осадков и испарением, которая в многолетнем масштабе эквивалентна речному стоку, также предположительно будет возрастать в течение XXI века. К 2080 году ожидается увеличение речного стока на 10-30% (большая величина соответствует сценарию A2, меньшая – сценарию B1). Наибольшее увеличение стока прогнозируется для бассейна р. Лена. Последствия влияния предстоящих изменений в характере пресноводного стока на атмосферную циркуляцию неизвестны.

15.3.3. Предполагаемые изменения в океанах

Последние исследования (Zhang, Walsh, 2006), базирующиеся на результатах моделирования в рамках подготовки Четвертого оценочного доклада, прогнозируют сокращение средней многолетней площади распространения плавучих льдов в Арктике к 2080-2100 гг. на 31% (согласно сценарию A2), на 33% (согласно сценарию A1B) и на 22% (согласно сценарию B1) (см. рис. 15.3). Причем сокращение ареала распространения льдов будет относиться преимущественно к летнему сезону, в то время как многие модели показывают увеличение этой площади в зимний период. Сокращение ареала плавучих льдов в Арктике приведет к изменению увлажнения северных прибрежных регионов, что окажет влияние на скорость фрагментации ледников и образование айсбергов в регионе. Также на открывшихся от льда акваториях усилится ветровая циркуляция вод.

Прогнозируемое увеличение стока рек Арктического региона и рост количества осадков над океанами, вместе с предполагаемым увеличением пресноводного стока в результате таяния ледникового щита Гренландии (Lemke et al., 2007) указывает на ожидаемое опреснение поверхностных морских вод в высоких широтах Северного полушария. Вместе с тем предполагаемые изменения в режиме и объемах сброса льда в виде айсбергов не прогнозируются из результатов моделирования, поскольку эти параметры не учитываются в моделях.

3.4. Предполагаемые изменения на суше

Арктика

Поскольку продолжительность устойчивого снежного покрова будет существенно различаться в разных регионах, это окажет существенное воздействие на подстилающую поверхность и местный микроклимат – в первую очередь за счет повышения альбедо и удерживания тепла земной поверхностью. В Евразии и – в меньшей степени – в Северной Америке в течение последних трех десятилетий наблюдалось увеличение продолжительности периода без снега – примерно на 5-6 дней за 10 лет (Dye, 2002). Сокращение бесснежного периода преимущественно приходится на весенний сезон. Большинство моделей указывают на то, что данный процесс будет продолжаться. Все это окажет влияние как на природные процессы, так и на хозяйственную деятельность в регионе – например, за счет увеличения возможностей для сельского хозяйства и транспорта (Anisimov et al., 2005a).

Предполагается, что продолжающееся сокращение (таяние) арктических ледников окажет влияние на уровень Мирового океана (Meehl et al., 2007). Можно ожидать увеличения мощности ледникового щита Гренландии за счет возросшего количества осадков при одновременном сокращении/истончении береговой части ледников (Krabill et al., 2000; Johannessen et al., 2005) в ответ на усиление летнего таяния (Abdalati, Steffen, 2001) и ускорение стока многих приморских ледников (Krabill et al., 2004; Howat et al., 2005; Ekstrom et al., 2006; Luckman et al., 2006; Rignot, Kanagaratnam, 2006). В то же время анализ имеющихся данных позволяет предположить, что в целом будет происходить сокращение массы ледникового щита.

Как следствие изменения климата в XXI веке следует ожидать продолжения потепления, таяния ледников и сокращения ареала многолетней мерзлоты (Sazonova et al., 2004; Euskirchen et al., 2006; Lemke et al., 2007). В результате моделирования процессов по разным климатическим сценариям IPCC получается, что Северное полушарие к середине XXI века потеряет от 20 до 35% многолетней мерзлоты – преимущественно за счет ее таяния вдоль южной границы распространения, где мерзлота имеется лишь местами; но также следует ожидать сокращения ее ареала в местах действительно многолетнего ее залегания (Anisimov, Belolutskaia, 2004).

Ожидаемое увеличение глубины оттаивания мерзлоты будет неодинаковым в пространстве и во времени. В течение трех ближайших десятилетий можно ожидать увеличения глубины сезонного оттаивания многолетней мерзлоты на 10-15%; к середине XXI века эта величина может возрасти до 15-25% (до 50% и более в некоторых местах); а к 2080 г. – до 30-50% и более в пределах всего ареала многолетней мерзлоты (Anisimov, Belolutskaia, 2004; Instanes et al., 2005).

Антарктика

Происходящие и предполагаемые изменения в состоянии ледяного покрова Антарктики обсуждаются широко и детально в другом обзоре (Lemke et al., 2007) и кратко суммируются в данном докладе. Последние данные относительно изменения размеров и объема ледяного панциря Антарктиды наилучшим образом картированы и объяснены в TAR, но значительные различия в предлагаемых

теориях пока ограничивают возможность предсказания развития событий. Только ледяной покров Антарктического полуострова в настоящее время демонстрирует ответную реакцию на изменение климата (см. раздел 15.6.3.), в то время как основная масса ледового покрова западной и восточной Антарктики не показывает столь очевидной реакции на изменение климата.

Имеются сведения относительно существенного сокращения ледового покрова в западной Антарктике (особенно в районе моря Амундсена) (Payne et al., 2004; Shepherd et al., 2004), но пока собрано недостаточно океанографических данных, определенно подтверждающих эти свидетельства. Может оказаться, что на самом деле дегляциация, следующая за последним ледниковым периодом, в некоторых частях Западной Антарктики еще не завершена (Stone et al., 2003). Теории по-прежнему конкурируют, но сегодняшнее отчетливое изменение ледникового щита дало новый толчок дискуссии о том, должны ли мы ожидать частичного разрушения Западноантарктического ледяного щита в течение нескольких столетий или тысячелетия (Vaughan, 2007). Исследования, основанные на дистанционном зондировании, не предоставляют однозначных свидетельств относительно баланса массы и Восточноантарктического ледяного щита – одни исследователи сообщают о сокращении краевой зоны оледенения (Davis et al., 2005), в то время как другие не отмечают существенных изменений (Zwally et al., 2005; Velicogna, Wahr, 2006; Wingham et al., 2006).

Многолетняя мерзлота на свободных ото льда участках, сезонный снежный покров и озерный лед распространены в Антарктике столь ограниченно, что обсуждаются только в контексте воздействия отдельных факторов.

15.4. Ожидаемые воздействия и предполагаемые последствия изменения климата

15.4.1. Управление пресноводными системами

15.4.1.1. Арктические пресноводные системы и их исторические изменения

Часть пресноводных систем Арктики целиком находится в пределах региона, другие получают питание из регионов располагающихся южнее. Из числа последних пять речных систем входят в число крупнейших мировых водостоков, обеспечивающих движение вод, перенос тепла, осадков, питательных веществ, транспорт биологических видов и загрязняющих веществ из других регионов в Арктику. Любые перемены в масштабах всего бассейна этих речных систем приведут к значительным воздействиям на Арктический регион.

Исторически наибольшие изменения в системах северных рек были вызваны регулированием стока (преимущественно в верхнем течении). В Канаде и России реки, текущие на север, имеют огромный потенциал для развития крупномасштабной гидроэлектроэнергетики (напр., Shiklomanov et al., 2000; Prowse et al., 2004). Для этих речных систем наиболее вероятным последствием изменения климата станет изменение режима стока – он увеличится в зимний период и сократится в летний, что увеличит сезонную изменчивость. В случае крупнейших рек Арктического бассейна в Северной Америке, в частности р. Макензи, очень трудно отделить эффект изменений климата от регулирования стока вследствие дополнительного подпруживающего эффекта, связанного с естественным накоплением воды в озерах и сбросом из них (Gibson et al., 2006; Peters et al., 2006). Для таких крупных северных российских рек, как Обь и Енисей, уже отмечены сезонные изменения режима со снижением зимнего стока, что считается результатом климатических изменений (Yang et al., 2004a; Yang et al., 2004b). С другой стороны, зимний сток еще одной крупной российской северной реки – Лены – увеличился в результате потепления и увеличения осадков (Yang et al., 2002; Berezovskaya et al., 2005). Можно предположить, что изменение режима осадков приведет к существенным изменениям в режиме стока северных рек, однако определенных данных на этот счет пока нет по причине слабого развития сети гидрографического мониторинга (Walsh et al., 2005). Пространственные закономерности изменения сроков половодья в расположенных по соседству бассейнах, однако, не прослеживаются: на Лене наблюдается наиболее раннее (Yang et al., 2002), а на Енисее – наиболее позднее за последние 60 лет весеннее половодье (Yang et al., 2004). Хотя изменения уровня осадков часто подозреваются в качестве причины многих изменений стока рек, проверка этого предположения затруднена из-за редкой сети мониторинга за осадками в Арктике (Walsh et al., 2005). Выявлению сезонного отклика стока на уровень осадков могут также мешать эффекты таяния многолетней мерзлоты и связанные с ними изменения потоков и времени переноса вод (Serezze et al., 2003; Berezovskaya et al., 2005; Zhang et al., 2005). За последние полвека общий сток шести крупнейших рек Евразии увеличился примерно на 7%, что составило 2 км^3 в год (Peterson et al., 2002). Причины этого пока определенно не выяснены, однако такие факторы, как оттаивание многолетней мерзлоты, лесные пожары и режим использования водохранилищ исключены из списка возможных причин наблюдаемого увеличения объемов стока (McClelland et al., 2004). В конце XX века отмечено также увеличение поступления в Северный Ледовитый океан вод от тающих приполярных ледников, ледяных куполов и щитов. Объемы увеличившегося ледникового стока сравнимы с общим увеличением стока крупнейших рек Арктического региона (Dyurgerov, Carter, 2004).

В Арктике представлены различные типы стоячих (lentei/still-water) пресноводных систем – от мелких заболоченных низин в тундре до крупных озер. Сезонные сдвиги в режиме их стока, ледяного покрова, осадков и испарения, поступления/образования осадков и питательных веществ – определяются как регулируемые климатом факторы, связанные с биоразнообразием и углеродно-метановым циклом (Wrona et al., 2005). Большое количество имеющихся для Арктики палеолимнологических данных отмечают синхронность изменений состава биологических сообществ и характера донных осадков – вслед за климатическими сдвигами, увеличением среднегодовых и средних летних температур и т.д. Все эти изменения в первую очередь связаны с нарушением или изменением стабильности термической стратификации и ледового режима (напр., Korhola et al., 2002; Ruhland et al., 2003; Pienitz et al., 2004; Smol et al., 2005; Prowse et al., 2006b).

Многолетняя мерзлота играет важную роль в гидрологическом режиме стоячих пресноводных водоемов – в первую очередь за счет влияния на проницаемость подстилающей поверхности (Hinzman et al., 2005). В ходе наблюдений за процессами, происходящими на территории более 500 000 км² богатых озерами земель Сибири в течение последних 30 лет XX века, были отмечены значительные изменения, связанные с исчезновением озер (см. рис. 15.4., Smith et al., 2005). Некоторые исследователи уверены, что процесс исчезновения озер связан с разрушением многолетней мерзлоты.

15.4.1.2. Возможное влияние последствий изменения климата на гидрологический режим

Изменения в режиме пресноводных систем Арктики неизбежно окажут влияние на физические условия региона, затронув, в частности, экстремальные гидрологические явления, глобальные обратные связи и пути распространения загрязнителей.

Гидрологические модели, основанные на глобальной циркуляции в системе океан-атмосфера, показывают постепенное увеличение стока рек бассейна Северного Ледовитого океана. Особое увеличение стока ожидается в холодный период (Miller, Russell, 2000; Arora, Boer, 2001; Georgievsky et al., 2003; Mokhov et al., 2003). Меньше определенности с переменами, ожидаемыми в летний период. Некоторые результаты исследований говорят о возможном сокращении объемов летнего стока по причине превышения испарения над осадками (напр., Walsh et al., 2005). Сокращение летнего стока может распространиться на многие водосборные бассейны по причине увеличения транспирации (испарения влаги с поверхности зеленых растений) за счет сдвигов в составе растительности от распространенных в настоящее время тундровых лишайников, дающих минимальное испарение, – к разнообразным видам древесной растительности, дающих значительно большее испарение (напр., Callaghan et al., 2005).

Индуцированное возрастающей концентрацией двуокиси углерода уменьшение транспирации может компенсировать действие этого фактора; предполагается, что именно оно ответственно за некоторые изменения речного стока, происшедшие в XX веке (Gedney et al., 2006).

Поскольку реки Арктики являются основным источником поступления пресных вод в систему как самого Северного Ледовитого океана (Lewis et al., 2000), так и Северной Атлантики, изменение объемов пресноводного стока способно оказать влияние на глубоководную циркуляцию (Bindoff et al., 2007). Увеличение объемов поступления пресных вод в Северный Ледовитый океан привело к увеличению их содержания также и в Северной Атлантике в 1965-1995 гг. (Peterson et al., 2006). Согласно имеющимся сценариям изменения климата под влиянием роста концентрации парниковых газов в атмосфере, к концу XXI века годовой речной сток в бассейне Северного Ледовитого океана увеличится на 10-30%. Дополнительным источником поступления пресных вод станет таяние ледников и ледяных щитов, преимущественно в Гренландии (Gregory et al., 2004; Dowdeswell, 2006). Влияние возросшего поступления пресных вод на циркуляцию морских вод остается не до конца понятым, но дает дополнительный повод для опасения за будущее региона (Loeng et al., 2005; Bindoff et al., 2007).

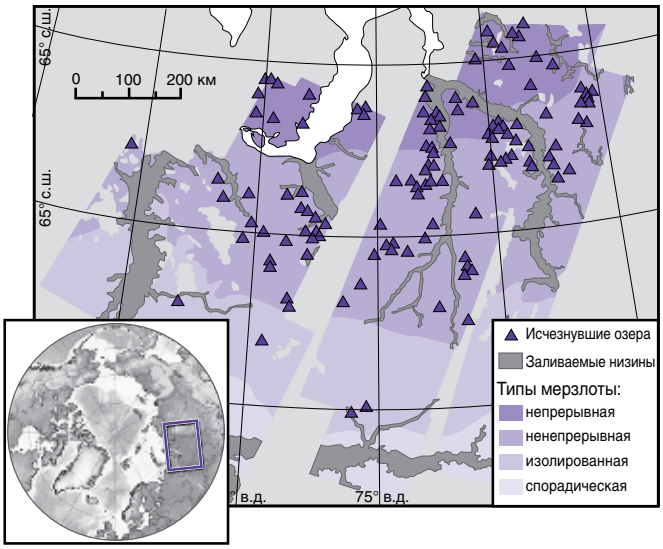


Рисунок 15.4. *Расположение исчезнувших сибирских озер. Результаты спутниковых наблюдений за тридцатилетний период (с начала 70-х годов XX века по 1997-2004 гг.) происходящего повышения температуры приземного слоя атмосферы и почвы в регионе (воспроизведено из Smith et al., 2005).*

Предсказывается сокращение/изменение ледового покрова рек и озер под влиянием происходящего потепления, что отразится как на термальных процессах в водоемах, так и на качественном/количественном составе местных пресноводных экосистем – что увеличит силу и продолжительность наводнений за счет возникновения ледяных заторов (Prowse et al., 2006a). Связанные с наводнениями предсказываемые ранние потоки талых вод создадут условия более благоприятные для катастрофических прорывов подпруженных заторами вод (Prowse, Beltaos, 2002), хотя более продолжительный теплый период может снизить остроту этой проблемы (Smith, 2000). Увеличение переноса тепла крупными реками в направлении юг – север приведет к уменьшению региональных различий с соответствующим уменьшением гидрологических и физических градиентов. Как ожидается, все эти события могут создать условия для труднопрогнозируемых изменений, способных радикально переломить ситуацию в Арктическом регионе (Prowse et al., 2006a).

Ожидаемые изменения в состоянии многолетней мерзлоты, растительного покрова и объемов речного стока могут оказать заметное воздействие на морфологию рек, дестабилизируя берега, увеличивая эрозию речного ложа и перенос осадков. Геологические исследования и результаты моделирования указывают на возможное увеличение риска наводнений – особенно в период оттаивания многолетней мерзлоты (Bogaart, van Balen, 2000; Vandenberghe, 2002). Эти изменения в основном обуславливаются пороговыми характеристиками в поступлении и выносе осадков в реку (Vandenberghe, 2002). В то же время исторические примеры показывают, что изменчивость расхода воды менее важна, чем поступление осадков, которое в значительной степени определяется растительным покровом (Huisink et al., 2002; Vandenberghe, Huisink, 2003). Увеличение плотности растительного покрова способно сдерживать транспорт осадков – об этом говорят результаты моделирования процессов в реках Арктического региона, как в условиях возрастания

температур, так и увеличения объемов речного стока (Syitski, 2002).

Изменения в гидрологии Арктики могут оказать влияние на содержание загрязняющих веществ (таких как стойкие органические соединения и ртуть), которые попадут в арктические водные системы благодаря процессам смены или недостатку растворяющих веществ (напр., MacDonald et al., 2003). Считается очевидным, что в целом климатические условия Арктического региона станут более влажными, увеличивая влияние загрязнителей, более активных в водной среде, – что будет оказывать негативное воздействие, несмотря на предполагаемое глобальное сокращение выбросов (напр., MacDonald et al., 2003). Сдвиги в других составляющих гидрологического режима – влиянии растительного покрова, режиме речного стока, термокарстовом дренировании и т.д. (Hinzman et al., 2005) – также могут увеличить способность элементов ландшафта задерживать загрязняющие вещества. Изменения в пищевых цепях водоемов способны усилить влияние поступающих загрязняющих веществ на экосистемы (см. раздел 15.4.1.3.).

15.4.1.3. Возможное влияние последствий изменения климата на продуктивность и биоразнообразие в водоемах

Ожидаемые изменения в режиме речного стока и в ледовом режиме пресноводных водоемов, в сезонном и многолетнем водном балансе, в температурных характеристиках – все это приведет к изменению в биоразнообразии и продуктивности пресноводных систем (Walsh et al., 2005; Prowse et al., 2006b; Wrona et al., 2006a). В конечном итоге заметные перемены ожидаются в плотности популяций и географическом распространении водных организмов – в первую очередь рыб (Reist et al., 2006a). Увеличение продолжительности свободных ото льда сезонов может стать причиной снижения устойчивости и сокращения пригодных для рыб местообитаний – особенно это относится к таким холодолюбивым видам, как озерная форель (*Salvelinus namaycush*) (Hobbie et al., 1999; Reist et al., 2006b). Ожидаемое увеличение речного стока усилит транспорт речных отложений и биогенов в Северный Ледовитый океан – что также повлияет на продуктивность морских вод (Carmack, Macdonald, 2002).

Усиливающееся таяние многолетней мерзлоты и углубление активного слоя приведет к увеличению содержания в экосистемах биогенов, накоплению осадков и углерода, что активизирует деятельность микроорганизмов и продуктивность высших звеньев пищевых цепей в системах, испытывающих недостаток питательных веществ. С увеличением в водной среде содержания растворенного органического углерода снизится проникновение в водную толщу разрушительного ультрафиолетового излучения при одновременном снижении фотохимической активности и сокращении выхода органических продуктов фотохимических реакций, что, скорее всего, будет не столь заметно в высокопродуктивных системах (Reist et al., 2006b; Wrona et al., 2006a). Увеличение поступления осадков в водоемы отрицательно повлияет на донные биотопы и нерестовые участки рыб. Это произойдет за счет возросшего биологического потребления кислорода и гипоксии/аноксии, связанной с осадконакоплением, и потери местообитаний через заиление (Reist et al., 2006a). Будут ли пресноводные водоемы функционировать как производители углерода или как его потребители – будет зависеть от сложных взаимодействий между температурным режимом, количеством и формой содержания питательных веществ и глубиной водоемов (Frey, Smith, 2005; Flanagan et al., 2006). Таяние многолетней мерзлоты приведет к расширению существующих заболоченных акваторий и возникновению новых водоемов, в результате чего усилится роль водных сообществ в тех местах, где прежде преобладали наземные виды (Wrona et al., 2006b). В случае дальнейшего таяния мерзлоты поверхностные воды начнут активно просачиваться в подземные горизонты, что приведет к сокращению их размеров и угнетению жизнедеятельности пресноводных экосистем.

В настоящее время продвижение теплолюбивых видов в Арктический регион ограничено температурным режимом и краткосрочностью цикла размножения. В случае усиления внешней экспансии многие из вновь пришедших видов – в первую очередь рыбы – могут получить конкурентные преимущества или начать выедать виды, населяющие арктические водоемы (Reist et al., 2006a). Кроме того, экспансия с юга принесет с собой новых паразитов/вредителей/инфекции, к которым местные виды окажутся не адаптированными, что увеличит их смертность (Wrona et al., 2006b). Прямые перемены в условиях обитания – вместе с опосредованными сдвигами в структуре экосистем – будут оказывать значительное влияние на местную фауну уменьшая продуктивность, численность и биологическое разнообразие. Прямые эффекты будут особенно серьезны для пресноводных рыб, полностью зависящих от местных пресноводных экосистем (Reist et al., 2006c). Распространение проходных и полупроходных видов рыб, размножающихся в пресных водоемах, но проводящих значительную часть своего жизненного цикла в морях, по мере усиления опреснения прибрежной зоны может сместиться в сторону моря. Сходные сдвиги затронут мигрирующих морских птиц и млекопитающих.

Такие важные для хозяйственной деятельности человека виды рыб как чир (*Coregonus nasus*), омуль (*Coregonus autumnalis*), арктический голец (*Salvelinus alpinus*), нельма (*Stenodus leucichthys*), хариус (*Thymallus arcticus*) могут сократить свою численность или локально исчезнуть в результате невозможности размножения, возросшей конкуренции и выедания вновь появившимися хищниками (Reist et al., 2006a; Reist et al., 2006b; Reist et al., 2006c).

15.4.1.4. Возможное влияние на традиционное природопользование, экономику и образ жизни местного населения

Перечисленные выше ожидаемые, связанные с изменением климата изменения в гидрологии арктических рек (особенно принимая во внимание увеличение объемов весенних потоков) необходимо учитывать при разработке новых и поддержании на безопасном уровне эксплуатации имеющихся объектов инфраструктуры. Среди подобных объектов – буровые и насосные установки для добычи нефти и газа, трубопроводные системы, водохранилища и плотины, прочее гидроэнергетическое оборудование (World Commission on Dams, 2000; Prowse et al., 2004; Instanes et al., 2005).

Пресноводные системы крайне важны для поддержания традиционной деятельности и здоровья жителей Севера, полностью зависящих от имеющихся наземных и подземных пресноводных систем, из которых они берут как воду – для питья и технического водоснабжения,

так и другие жизненно важные ресурсы (United States Environmental Protection Agency, 1997; Martin et al., 2005). Использование воды из местных водоемов в необработанном виде традиционно практикуется во многих поселениях Арктического региона – несмотря на известный риск передачи заболеваний через обитающих в воде переносчиков инфекционных заболеваний (напр., Martin et al., 2005). Риск увеличения заболеваемости в регионе связан с ожидаемым продвижением на север нехарактерных для региона видов, а также связанных с ними заболеваний. Изменение гидрологических режимов северных рек может сократить возможность снабжения населения чистой пресной водой. Особенно это относится к поселениям, расположенным в прибрежной полосе, которые первыми столкнутся с проблемами, вызванными подъемом уровня океана и связанным с этим загрязнением подземных источников (Warren et al., 2005).

Экосистемы Арктического региона обеспечивают местных жителей практически всем необходимым – в первую очередь за счет сбора «даров природы» как для собственного потребления, так и для коммерческих целей (Reist et al., 2006b). Изменения в структуре экосистем приведут к значительным сдвигам в численности, способности к самовосстановлению и доступности привычных ресурсов – что скажется на образе жизни местных жителей (Nuttall et al., 2005; Reist et al., 2006b). Маловероятно, что предполагаемые изменения в структуре и жизнедеятельности пресноводных систем в результате изменения климата создадут дополнительные возможности для их процветания. Таким образом, сохранение биологического разнообразия водоемов Арктического региона, сохранение привычного образа жизни местных жителей, продолжение устойчивого использования ресурсов пресноводных водоемов станет значительно более сложной задачей с точки зрения управления ресурсами и принятия политических решений (Wrona et al., 2005; Reist et al., 2006b).

15.4.2. Наземные экосистемы и их значение для человека

15.4.2.1. Исторические и текущие изменения арктических наземных экосистем

Состояние климатических условий в течение последних более чем 20 тыс. лет сформировало современное биоразнообразие, структуру и особенности функционирования экосистем Арктического региона. Количество представленных там видов в настоящее время весьма невелико по причине их вымирания в прошлом (FAUNMAP Working Group, 1996). Крупные млекопитающие в целом сейчас более уязвимы к происходящим переменам по сравнению с теми временами, когда они были представлены большим числом видов. Характерные экосистемы зоны тундры в настоящее время не столь широко распространены, как в период последнего оледенения – во времена существования обширных пространств тундрово-степных экосистем (Callaghan et al., 2005). Современная фрагментация местообитаний (напр., Nellemann et al., 2001), истощение стратосферного озона, распространение антропогенного загрязнения и другие факторы осложняют текущее воздействие антропогенного изменения климата на экосистемы и их значение для человека.

Традиционные экологические знания (Traditional Ecological Knowledge – TEK), собранные в Канаде, отмечают такие изменения экосистем: угнетение растительного покрова, связанное с более теплым и сухим летом в восточных регионах, увеличение прироста растительной биомассы, связанное с наступлением более теплых, влажных и продолжительных летних периодов в западной части страны, появление некоторых южных видов и изменения в пастбищном поведении овцебыков и карибу с увеличением возможностей кормления в отдельных районах (Riedlinger, Berkes, 2001; Thorpe et al., 2001; Krupnik, Jolly, 2002).

В северной Фенноскандии популяционные циклы мышевидных грызунов и леммингов стали существенно сглаженными по сравнению с 80-ми годами XX века. Предположительно, это происходит в результате снижения весенних пиков их численности и плотности расселения, что в свою очередь связано с низкой выживаемостью в зимний период за счет изменений в снежном покрове (Ims, Fuglei, 2005; Yoccoz, Ims, 1999; Henttonen, Wallgren, 2001). Весьма существенно сократилась численность песцов, белого гуся и рогатого жаворонка (Elmhagen et al., 2000), в то время как отмечается продвижение в северном направлении лосей, лисицы, некоторых южных видов птиц (Hörnberg, 1995; Tannerfeldt et al., 2002). Нужно, правда, отметить, что конкретная роль изменения климатических условий в перечисленных процессах неизвестна.

Некоторые мигрирующие популяции птиц, например, арктических куликов, заметно сократились (Stroud et al., 2004) под влиянием различных факторов – среди которых изменение климата и потеря биотопов на путях миграций и местах зимовок (Morrison et al., 2001; Morrison et al., 2004; Zöckler, 2005). В противоположность этому численность размножающихся в Арктике гусей, все в большей степени кормящихся в зимний период на полях с возделываемыми или неубранными зерновыми культурами, показывает в Европе и Северной Америке увеличение в геометрической прогрессии; в результате гуси летом интенсивно кормятся в прибрежных арктических экосистемах, вызывая их истощение, сокращение растительного покрова и связанное с этим распространение засоленных грунтов (Jefferies et al., 2006). Более ранний весенний прилет арктических птиц на места гнездовий слабо подкрепляется фактами, хотя для умеренных широт таких примеров предостаточно (Gauthier et al.., 2005), что подчеркивает необходимость адекватной программы мониторинга (Both et al., 2005)..

В некоторых местах популяции таких жизненно-важных для местного населения животных, как карибу/северные олени, сокращаются (Russell et al., 2002; Chapin et al., 2005a); это происходит преимущественно в силу действия социальных и культурных факторов, хотя изменение климатических условий также оказывает воздействие на популяции. Образование ледяной корки в теплые зимы, которая ограничивает доступ к растительности, оказало воздействие на некоторые популяции северного оленя и овцебыка (Forchhammer, Boertman, 1993; Aanes et al., 2000; Callaghan et al., 2005 и ссылки в этих работах).

Накапливаются данные относительно происходящих изменений растительного покрова. Аэрофотосъемка показывает расширение зарослей кустарников на 70% в 200 местах на Аляске (Sturm et al., 2001; Tape et al., 2006). Вдоль границы распространения арктических и субарктических типов растительности отмечается продвижение лесов в северном направлении примерно на 10 км. А на полуострове Сивард (Seward Peninsula) на Аляске в течение

последних 50 лет около 2% тундры были замещены древесной растительностью (Lloyd et al., 2003).

Граница распространения древесных пород в горных местностях не демонстрирует однонаправленного движения в течение XX века: в субарктической части Швеции она поднялась на 60 м (Callaghan et al., 2004; Truong et al., 2006); в то же время эта граница была стабильна или понизилась в других северных регионах (Dalen and Hofgaard, 2005). Увеличение распространения болот стало причиной гибели древесной растительности в некоторых местах европейского сектора российской Арктики (Crawford et al., 2003).

В дополнение к изменениям древесной растительности в субарктической части Швеции растительные сообщества сухих местообитаний были частично заменены сообществами влажных местообитаний, что связано с возросшим увлажнением в результате таяния многолетней мерзлоты (Christensen et al., 2004; Malmer et al., 2005). Нечто подобное отмечается в Канаде, где в четырех районах растаяли до 50% мерзлотных торфяных плато (Beilman, Robinson, 2003).

В последнее время появились свидетельства увеличения продолжительности вегетационного периода и продуктивности растительных сообществ, но распространение этих процессов весьма неравномерно. Анализ спутниковых данных указывает на увеличение продолжительности вегетационного периода на Аляске на 3 дня за десять лет; и на 1 день за десять лет – в северной Евразии (McDonald et al., 2004; Smith et al., 2004; McGuire et al., 2007). При этом в результате некоторого похолодания в течение последних двадцати лет не отмечается увеличения вегетационного периода на Кольском полуострове (Høgda et al., 2007). Данные дистанционного зондирования показывают пространственную неоднородность процесса увеличения вегетационного периода: оно отмечается в южной Арктике, но при этом между 1982 и 1999 гг. отмечались противоположные процессы в центральном и восточном секторах российской Арктики (Nemani et al., 2003).

15.4.2.2. Ожидаемые изменения в биоразнообразии, биопродуктивности и зонировании растительности

В тех местах, где почвы оказываются подходящими для экспансии лесов, ожидается увеличение видового разнообразия и замещение тундровой растительности лесами (см. рис. 15.2., Callaghan et al., 2005). Некоторые виды, популяции которых поддерживаются в изолированных местообитаниях далеко к северу от основного ареала, с высокой вероятностью быстро расширят область своего распространения. Виды растений, за исключением наиболее северных и высокоширотных арктических, продвинутся в своем распространении к северу и выше в горы, однако степень доминирования и обилие многих из них уменьшатся. Скорость продвижения на север общей границы лесов труднопредсказуема: хотя известно, что в раннем голоцене (период отступления последнего оледенения, начавшийся примерно 10 тыс. лет назад и продолжающийся до настоящего времени) граница распространения лесов продвигалась на север со скоростью до 25 км в год, сейчас подобные скорости продвижения лесов маловероятны – более реальные темпы продвижения распространения древесных видов на север составят не более 2 км в год (Payette et al., 2002; Callaghan et al., 2005). Трофическая структура в Арктике довольно проста, ожидается поэтому, что снижение численности ключевых видов в Арктике приведет к каскадным эффектам: обрушению численности хищников, исчезновению источников пищи и т.д. Локальные изменения в распределении и численности генетически различных популяций станут первоначальным ответом генетически подразделенных видов на потепление (Crawford, 2004). Арктические животные, по-видимому, наиболее уязвимы к индуцированному потеплением увеличению сухости (беспозвоночные), изменениям в снежном покрове и в циклах замерзания – таяния, которые влияют на доступность пищи и защищенность от хищников, изменениям временной приуроченности (тайминга) миграций и размножения и появлению новых хищников, паразитов, конкурентов и болезней. Южные виды постоянно достигают Арктики, но немногим удается там прижиться (Chernov, Matveyeva, 1997). В результате прогнозируемых климатических изменений возможность обосноваться в новых местообитаниях увеличится, и некоторые виды, такие как американская норка, станут инвазивными, в то время как уже укоренившиеся на новых местах сорные южные виды растений продолжат свою экспансию. Тайминг и пути миграций птиц с высокой вероятностью изменятся, поскольку соответствующие арктические местообитания станут менее доступными (Callaghan et al., 2005; Uscher at al., 2005).

Эксперименты, воспроизводившие последствия летнего потепления на 1-3°C для арктических экосистем, показали ответную реакцию растительных сообществ уже через два вегетационных сезона; по сравнению с естественными условиями при проведении экспериментов увеличилась скорость роста низкорослых кустарниковых видов и началось сокращение видового разнообразия (Walker et al., 2006). Эксперименты с потеплением и дополнительным поступлением питательных веществ показали, что мхи и лишайники стали менее многочисленными, в то время как высшие растения увеличили темпы роста (Cornelissen et al., 2001; Van Wijk et al., 2003). Обогащение окружающей среды двуокисью углерода дает краткосрочную реакцию со стороны растений, при этом микробные сообщества меняют свою структуру и характер жизнедеятельности (Johnson et al., 2002), а устойчивость некоторых растений снижается, делая их более уязвимыми перед ранними морозами (Beerling et al., 2001). Увеличение дозы ультрафиолета В вызывало ограниченную реакцию растений, но снижало оборот биогенов (Callaghan et al., 2005; Rinnan et al., 2005). Подобное снижение потенциально приведет к уменьшению скорости роста растений.

Умеренные прогнозы на замещение сообществ тундры лесными сообществами к 2100 г. дают величину около 10% (Sitch et al., 2003, см. рис. 15.3.), хотя есть опубликованные сведения относительно возможного увеличения такого замещения до 50% (White et al., 2000). В то же время последствия изменения гидрологического режима, глубины оттаивания активного слоя и особенности землепользования не учитываются в моделях. Это значит, что реальные последствия будут гораздо более обширными и разнообразными. Власова (Vlassova, 2002) предполагает, что 475 000 км^2 лесной границы России уже разрушены, в результате чего происходит образование тундроподобных экосистем. Узкая прибрежная полоса тундры (преимущественно в Европейской части российской Арктики) будет полностью замещена лесными сообществами, которые достигнут Северного Ледовитого океана. Предположительно к 2080 г. тундра заместит от 15 до 25% полярных пустынь, где чистая первичная продукция органического углерода (net primary

production – NPP) увеличится на 70% (с 2,8 до 4,9 млрд. т в год) (Sitch et al., 2003). Географические ограничения, с которыми связаны изменения распространения растительности, приведут к значительной субрегиональной изменчивости в прогнозируемой динамике NPP от 45% в фрагментированном ландшафте до 145% при сплошном тундровом покрове (Callaghan et al., 2005).

Изменение климата в сторону потепления, скорее всего, увеличит активность вредителей, паразитов и частоту различных заболеваний, таких, какие вызывают, например, легочные гельминты у овцебыков (Kutz et al., 2002) и круглые черви у северных оленей (Albon et al., 2002). Кроме того, в бореальных лесах по мере усиления потепления увеличится частота крупных пожаров и распространение убивающих деревья насекомых-вредителей, что приведет к расширению площади лесотундр (Juday et al., 2005). Так, леса полуострова Кенай (Kenai Peninsula) на юге Аляски испытали в середине 90-х годов XX века массовое нашествие еловых жуков-короедов (spruce bark beetle), вызвавших гибель 10-20% хвойных деревьев на территории 16 000 км^2 (Juday et al., 2005). Также, следуя современному потеплению климата, непарный шелкопряд стал размножаться далеко на севере, достигая вызывающей проблемы численности (Juday et al., 2005), а осенняя дефолиация, вызванная молью, – что связывается с теплыми зимами в северной Фенноскандии, – распространилась на обширных территориях; ее охват, согласно прогнозу, будет увеличиваться и в дальнейшем (Callaghan et al., 2005).

15.4.2.3. Последствия изменения климата для структуры и жизнедеятельности экосистем

Изменение климата и связанное с этим распространение кустарниковой растительности в приполярных широтах приведет к изменению отражательной способности подстилающей поверхности. Это будет иметь как региональные (Chapin et al., 2005a), так и глобальные (Bonan et al., 1992; Thomas, Rowntree, 1992; Foley et al., 1994; Sturm et al., 2005; McCurie at al., 2007) последствия для дальнейшего изменения климата.

Производимые измерения показывают значительную пространственную неоднородность в объемах выделения (net release) и поглощения (net uptake) углерода при отсутствии определенных общих трендов для всего Арктического региона (Corradi et al., 2005). В противоположность этому результаты моделирования показывают некоторое увеличение поглощения углерода (на 20-40 г/м$^{-2}$ в год) (McGuire et al., 2000; Sitch et al., 2003, 2007). Высокая степень неопределенности в обоих случаях (в результате измерений и моделирования) показывает, что, предположительно, Арктика может как производить добавочное количество углерода, так и поглощать его. Скорее всего, в ближайшее время арктическая растительность и активный слой подстилающей поверхности едва ли станут заметным источником углерода в форме CO_2 (Callaghan et al., 2005; Chapin et al., 2005a). В то же время регион может стать источником значительной эмиссии метана, так что даже поглощение двуокиси углерода растительностью тундры не сможет перекрыть этой эмиссии и Арктика в общем балансе станет источником поступления парниковых газов в атмосферу (Friborg et al., 2003; Callaghan et al., 2005).

Повышение температуры, увеличение продолжительности вегетационного периода и ожидаемое продвижение в северном направлении растительного покрова в долгосрочной перспективе способно повысить связывание углерода; в то время как прогрев почвы и таяние многолетней мерзлоты способно усилить эмиссию содержащих углерод газов в краткосрочной перспективе. Будет ли происходить увлажнение тундры или ее иссушение в результате потепления атмосферы и увеличения глубины оттаивания активного слоя (см. раздел 3.4.) – это определит общий баланс углерода и других сопровождающих газов в регионе. Усиление сухости приведет к увеличению активности источников углерода на Аляске (Oechel et al., 2000), повышенное увлажнение увеличит поглощение в скандинавских и сибирских болотах (Aurela et al., 2002; Johansson et al., 2006).

Результаты моделирования процессов в Арктике и Субарктике показывают, что регион, скорее всего, станет поглощать углерод больше, чем производить, хотя этот сдвиг в балансе будет выражен слабо (между 1960 и 2080 гг. почвами, растительностью и подстилкой будет в общей сложности аккумулировано около 18,3 млрд т углерода) (Sitch et al., 2003; Callaghan et al., 2005) – хотя эти прогнозы связаны с изрядной долей неопределенности. Увеличение эмиссии углерода в результате прогнозируемых нарушений и характера землепользования и чистого воздействия солнечной радиации, возникающего в результате изменения баланса между эмиссией метана и углекислого газа (Friborg et al., 2003; Johansson et al., 2006), являются основными источниками неопределенности. Увеличение увлажнения в результате осадков и таяния многолетней мерзлоты приведет, согласно прогнозу, к увеличению потока метана по сравнению с углекислым газом из поверхностного активного слоя и тающей мерзлоты (Walter et al., 2006).

Изменения лесопокрытой площади также могут иметь как отрицательные, так и положительные последствия для климата. Согласно одной из моделей, отрицательные обратные связи поглощения углерода и положительные обратные связи сниженного альбедо будут взаимодействовать. Эта модель предсказывает, что центральные канадские бореальные леса дадут чистую отрицательную обратную связь за счет поглощения (секвестрации) углерода; в то же время леса российской Арктики будут давать чистую положительную обратную связь за счет уменьшения альбедо (Betts, Ball, 1997; Betts, 2000).

15.4.2.4. Последствия для природопользования, местной экономики и традиционного образа жизни

Местные ресурсы являются одним из основных источников существования и традиционного образа жизни для жителей Арктики (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2003; Chapin et al., 2005a). Потребление пищевых продуктов, добытых из дикой природы жителями сельской местности Аляски, составляет 465 г в день, 16% из них составляют продукты, даваемые наземными млекопитающими, и 10% – растительная пища; для городского населения это потребление составляет только 60 г в день. Стоимость добываемых в условиях дикой природы пищевых продуктов (в масштабах всего штата Аляска) оценивается в 200 млн долл. США в год. Потребление в сообществах Канадской Арктики изменится от 106 г/день до 440 г/день, достигая от 6 до 40% общего потребления энергии и от 7 до 10 % общего дохода домохозяйств у Нунавик и Нунавут (Kuhnlein et al., 2001; Chabot, 2004). Ресурсы наземных экосистем включают карибу/северных оленей,

овцебыков, перелетных птиц и их яйца, растения и ягоды (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2003; Chapin et al., 2005a). Дикие и одомашненные олени особенно важны, поскольку они обеспечивают пищу, материал для укрытий, одежду, инструменты, транспорт и в некоторых случаях товары, продаваемые на рынке (Rlein, 1989; Paine, 1994; Kofinas et al., 2000; Jernsletten, Klokov, 2002). Древесина, дерн, торф и уголь продолжают использоваться повсеместно на севере в качестве топлива. Несмотря на значительную роль, которую играют эти ресурсы для жителей Арктического региона, происходит их постепенное замещение – в результате изменения образа жизни, культурных, социальных, экономических и политических условий (Chapin et al., 2005a). Под давлением климатических факторов такие изменения будут продолжаться, меняя состояние наземных экосистем и тем самым сокращая возможности местных жителей к сохранению привычного образа жизни. Все эти перемены делают привычных к условиям Арктического региона местных жителей «чужаками на собственных землях» (Berkes, 2002).

Сельскохозяйственная деятельность в южных районах Арктики ограничена коротким и прохладным вегетационным периодом, отсутствием соответствующей инфраструктуры, низкой плотностью населения, слабостью внутреннего рынка и удаленностью от крупных рынков (Juday et al., 2005). Северная граница пригодных для с/х деятельности территорий (с определенным приближением) может быть проведена исходя из кумулятивной суммы градусо-дней с температурой выше +10°C (Sirotenko et al., 1997). К середине XXI века происходящее потепление может сдвинуть существующую границу на несколько сотен километров севернее в большинстве районов Сибири и в среднем до ста километров в целом по России (Anisimov, Belolutskaia, 2001). Это даст возможность для расширения сельского и лесного хозяйства в тех регионах, где имеются инфраструктура и традиционно сложившиеся рынки. Существующие системы охраны природы и охраняемые территории смогут защитить регион от увеличения прямого антропогенного давления, но они окажутся бессильны перед происходящими в результате потепления процессами смены природной зональности. Поэтому решения относительно целей и методов природоохранной политики в будущем следует принимать как можно раньше (Callaghan et al., 2005; Klein et al., 2005; Usher et al., 2005).

15.4.3. Морские экосистемы и их значение для человека в Арктике

15.4.3.1. Исторические изменения в морских арктических экосистемах

В ходе наблюдений за температурой вод Северной Атлантики на протяжении последних 200 лет были выявлены определенные закономерности ее колебания. Последствия таких колебаний были весьма чувствительными как для планктона, так и для дрейфующей икры рыб – в том числе таких важных в промысловом отношении видов, как треска и сельдь (Loeng et al., 2005; Vilhjálmsson et al., 2005) (см. раздел 15.6.). Эти климатические воздействия накладывались на влияние возрастающего вылова.

15.4.3.2. Общие последствия потепления климата для океана

Меняющиеся климатические условия над арктическими и субарктическими морями и океанами ведут к изменению биоразнообразия, распространения и продуктивности морских обитателей – преимущественно за счет сокращения границ морского распространения льда. По мере продвижения к северу границы арктических льдов также сдвигаются ареалы приспособившихся к обитанию на границе зоны льдов видов, таких как веслоногие рачки (копеподы) и рачки-амфиподы, а также питающаяся ими сайка, или полярная тресочка (*Boreogadus saida*) (Sakshaug et al., 1994). Со временем этот процесс окажет серьезное влияние на других хищников: тюленей, морских птиц и вершину трофической пирамиды – белых медведей (*Ursus maritimus*), питание которых зависит от распространения морских льдов (см. Главу 4, бокс 4.3.; Sakshaug et al., 1994), а также жителей Арктики, зависящих от охоты на них (Loeng et al., 2005; Vilhjálmsson et al., 2005).

Уменьшение толщины льда и уменьшение распространения ледового покрова существенно изменят характеристики экосистем, связанных с морским льдом (Loeng et al., 2005). Сайка, важнейший компонент этих экосистем, является основным сточником пищи для многих морских млекопитающих. Нерпы, которые нуждаются в морском льде для размножения, линьки и отдыха, питаются обитающими у нижней поверхности льда амфиподами и сайкой. Более раннее разрушение льда может не только привести к высокой смертности детенышей тюленей, но и вызвать поведенческие изменения в их популяциях (Loeng et al., 2005). Белый медведь, замыкающий пищевую цепь, в высшей степени зависит как от морского льда, так и от нерп см. Главу 4, бокс 4.3.). Первоначально утрата морского льда и ее разрушительные последствия произойдут на южной границе распространения белых медведей, где раннее таяние и позднее замерзание увеличат период, в течение которого медведи вынуждены жить на суше, где их возможности добыть пищу ограничены. В последнее время состояние взрослых медведей ухудшилось, например, в районе Гудзонова залива, а медвежата первого года приходят на берег просто истощенными (Stirling et al., 1999; Derocher et al., 2004; Stirling & Parkinson, 2006). В результате раннего разрушения льда доля медвежат в популяции снизилась. Уменьшение ледовитости может также отрицательно сказаться на других арктических морских зверях, таких как морж (*Odobenus rosmarus*), который использует лед как площадку для отдыха и который обитает в узком диапазоне условий и отличается ограниченной способностью к переселению. Сходным образом нарвал (*Monodon monoceros*) и гренландский кит (*Balaena mysticetus*) зависят от приледовой биоты для своего питания и полыней для дыхания (Loeng et al., 2005). Раннее таяние льда может привести к значительному несовпадению сезонных циклов этих животных и вторичной продукции, что тяжело отразится на популяциях морских млекопитающих (Loeng et al., 2005).

С расширением площади открытой воды увеличится первичная и вторичная продуктивность морских экосистем, от чего выиграют все наиболее коммерчески значимые виды рыб в арктических и субарктических морях. Среди них тресковые (*Gadus morhua*) и сельдь (*Clupea harengus*) в Северной Атлантике; минтай (*Theragra chalcogramma*) в Беринговом море – на долю которых приходится около 70% всего вылова рыбы в регионе. В то же время некоторые холодолюбивые виды – северная креветка (*Pandalus borealis*), а также камчатский, синий и колючий крабы (*Paralithoides ssp.*) – могут потерять свои традиционные местообитания (Vilhjálmsson et al., 2005).

4.3.3. Прогнозирование продуктивности промысловых видов и их кормовой базы

Количественное прогнозирование изменений продуктивности промысловых видов и их кормовой базы при повышении температуры океанских вод крайне затруднительно по следующим причинам: **(а)** низка точность имеющихся моделей, используемых для прогнозирования; **(б)** активный промысел в значительной мере изменил/подорвал запасы промысловых рыб, поэтому популяции вряд ли будут так же реагировать, как они бы реагировали в неизмененном состоянии; **(в)** влияние умеренных климатических перемен температуры в диапазоне +(1-3)°C менее значимы в сравнении с действенной рыболовной политикой и ее эффективным применением.

Примеры, приведенные во Врезке 15.1., показывают, как климатические изменения, промысловая эксплуатация и другие факторы, затрагивающие морские экосистемы, могут глубоко взаимодействовать на северных пределах распространения видов и как эффект этого взаимодействия ослабевает далее к югу (напр. Rose et al., Rose, 2004; Drinkwater, 2005).

Изменения в распространении промысловых видов могут привести к конфликтам в сфере прав рыболовства, что потребует дополнительных переговоров для достижения согласия в использовании/управлении рыбными ресурсами (Vilhjálmsson et al., 2005).

В дополнение к всему перечисленному, повышение температуры морской воды приведет к усилению токсического цветения воды (активного размножения водорослей, выделяющих токсины), распространению болезней и паразитов морских организмов, загрязнению морской среды, что будет оказывать все более сильное воздействие за счет расширения судоходства (Loeng et al., 2005; Vilhjálmsson et al., 2005).

15.4.4 Морские экосистемы Антарктики и их услуги

Экосистемы Южного океана испытали существенное влияние антропогенной деятельности. Интенсивный промысел на протяжении 200 лет поставил на грань исчезновения некоторые виды китов и тюленей (например, кергеленского морского котика, синего кита и финвала). С 1960-х гг. в регионе велся активный рыболовный промысел, что привело к значительному сокращению запасов промысловых рыб в море Скотия и прилегающих районах. Эти запасы до сих пор не достигли прежних уровней. Однако в отличие от Арктики использование биоресурсов Южного океана основано на экосистемном подходе и осуществляется в рамках специального международного соглашения – Конвенции о сохранении морских живых ресурсов Антарктики (CCAMLR), входящей в систему Договора об Антарктике. Конвенция, разработанная для обеспечения устойчивого использования и сохранения естественных морских экосистем, подчеркивает необходимость учета более широкого контекста, в котором осуществляется промысел отдельных видов, включая пищевую сеть в целом, а также изменения состояния окружающей среды. Конвенция применима к районам к югу от Антарктической конвергенции; решения по управлению ресурсами принимаются на основе консенсуса сторон (Constable et al., 2000).

В настоящее время основными промысловыми видами рыб являются патагонский клыкач (*Dissostichus eleginoides*) и, в меньшей степени, ледяная рыба (*Champsocephalus gunnari*). Объемы добычи антарктического криля (*Euphausia superba*) росли на протяжении 70-х годов прошлого века и достигли максимального уровня в 1980-е гг., превысив 500 тыс. т/год. В настоящее время годовой вылов криля составляет около 100 тыс. т/год (Jones and Ramm, 2004), что значительно ниже установленного в рамках Конвенции максимально допустимого объема добычи, обеспечивающего сохранение запасов криля.

На протяжении XX века температуры воздуха, морских льдов и воды в море Скотия, а также в окрестностях Антарктического полуострова (см. раздел 15.6.3.) испытывали существенные изменения. Запасы криля в районе моря Скотия, важном промысловом районе, сократились более чем на 50% (Atkinson et al., 2004). Предполагается, что снижение численности криля в этом районе связано с сокращением площади морских льдов на юге моря Скотия и в окрестностях Антарктического полуострова (Atkinson et al., 2004). Поэтому дальнейшее уменьшение площади льдов способно привести к дальнейшим изменениям распространения и численности криля с соответствующим влиянием на пищевые сети во всем регионе, где криль составляет основу рациона многих хищных видов и где ведется его промысел. Применительно к другим видам неопределенность в прогнозах динамики климата ведет к неопределенности в оценке воздействия, однако повышение температуры и сокращение площади зимних морских льдов с неизбежностью окажут влияние на воспроизводство, рост и развитие криля и рыбы, что приведет к дальнейшему снижению численности популяций и изменению распространения видов. Однако способность различных видов к адаптации неодинакова. Так, некоторые «холоднокровные» (пойкилотермные) организмы могут погибнуть при повышении температуры до 5-10°C (Peck, 2005). В то же время большой широколобик (*Pagothenia borchgrevinki*), который может жить при температурах ниже нуля благодаря наличию в крови белков-антифризов, способен адаптироваться к повышению температуры, плавая при +10°C столь же эффективно, как и при –1°C (Seebacher et al., 2005).

Во все большей степени осознается связности океана для функционирования экосистем антарктических вод. Простые сценарии потепления могут указывать на возможность смещения промысловой деятельности и связанного с ней воздействия к югу, однако вероятным является и промысел новых видов в традиционных районах. Более сложные изменения в картине океанической циркуляции способны оказать значительное влияние на морские экосистемы и промыслы, хотя некоторые последствия этих изменений могут не носить отрицательного характера и быть благоприятными для некоторых видов. Однако сложные взаимодействия в пищевых цепях могут приводить к труднопредсказуемым вторичным воздействиям. Например, сокращение численности криля способно оказать негативное воздействие на виды рыб, причем эти эффекты не будут ограничены экосистемами Южного океана. Многие виды высших хищников зависят от экосистем более низких широт во время антарктической зимы, а также сезонов размножения.

Конвенция о сохранении морских живых ресурсов Антарктики предоставляет базовый механизм для управления использованием биоресурсов на основе превентивных подходов в меняющихся условиях окружающей среды. Однако для уточнения характеристик изменения и его последствий необходимы данные мониторинга, охватывающие более длительные периоды времени, а также обширные территории и акватории.

Врезка 15.1. Атлантическая треска в XX веке: исторические примеры

Эта врезка демонстрирует, каким образом популяции трески на протяжении XX века и до 2005 г. реагировали на множественные факторы стресса, связанные с изменением температуры океана, промыслом, а также изменением численности кормовых видов и хищников. К настоящему моменту численность всех четырех популяций трески существенно сократилась и они представляются уязвимыми для дальнейших изменений климата и режима промысла. Однако данные позволяют предположить, что популяции, обитающие к югу от полярного фронта, менее уязвимы, чем находящиеся к северу от него.

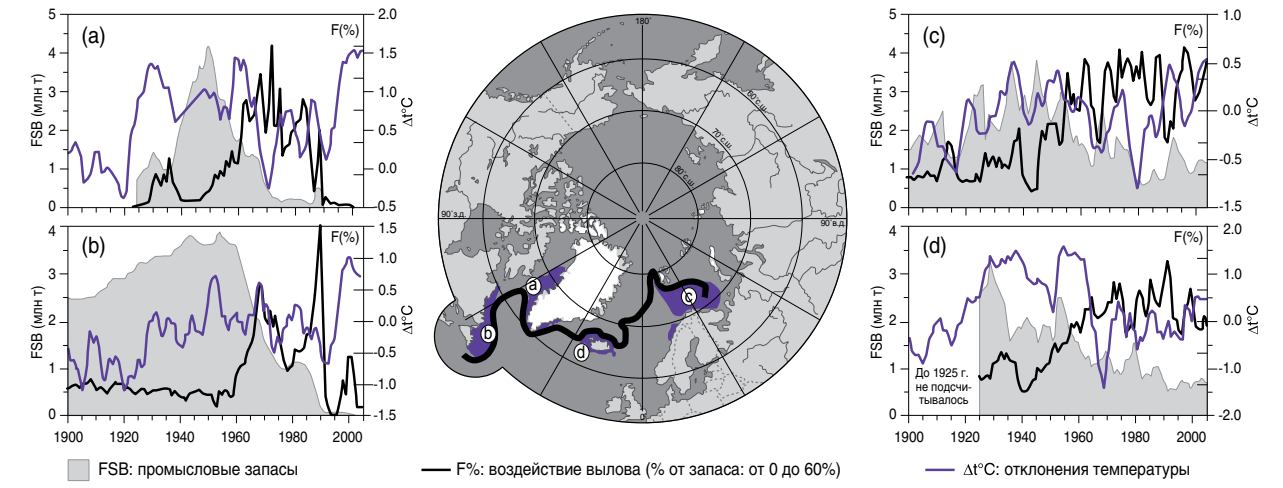


Рис. 15.5. *Географическое распределение четырех основных популяций трески в Северной Атлантике (синие участки). Сплошной черной линией отмечено среднее положение полярного фронта. Графики (a: Западная Гренландия; b: Ньюфаундленд/Лабрадор; c: Баренцево море; d: Исландия) демонстрируют динамику промысловых запасов (серый цвет), уловов (цветная линия) и температур (черная линия) на протяжении периода 1900-2005 гг. Источники данных: Гренландия (Buch et al., 1994; Horsted, 2000; ICES, 2006); Ньюфаундленд/Лабрадор (Harris, 1990; Lilly et al., 2003); Исландия (Schopka, 1994; Hafrannsóknastofnunin, 2006; ICES, 2006); Баренцево море (Bochkov, 1982; Hylen, 2002; ICES, 2005a), данные за период с 1981 г. любезно предоставлены Полярным научно-исследовательским институтом морского рыбного хозяйства и океанографии (ПИНРО), Мурманск, Россия.*

Гренландия

Данные наблюдений за температурой океана у западного побережья Гренландии, систематически ведущихся с 1870-х гг., показывают, что температура была очень низкой до резкого потепления около 1920 г., после которого она оставалась на высоком уровне до столь же резкого спада в конце 1960-х гг. (Jensen, 1939; Buch et al., 1994; Vilhjálmsson, 1997; см. рис. 15.5a). Во второй половине XIX века в гренландских водах не было атлантической трески (Jensen, 1926; Buch et al., 1994), в то время как богатые промыслы трески находились у берегов Исландии (Jensen, 1926, 1939; Buch et al., 1994). Во время потепления в начале 1920-х гг., большое количество молодых особей исландской трески мигрировало к западному побережью Гренландии, сформировав там самоподдерживающуюся популяцию, которая исчезла в 1970-е гг. (Buch et al., 1994; Vilhjálmsson, 1997; Vilhjálmsson et al., 2005).

Сопоставление данных об уловах и температуре показывает, что наличие трески у берегов Гренландии зависит главным образом от температуры океана к западу от острова (Horsted, 2000). Таким образом, восстановление популяции трески в гренландских водах, вероятно, будет зависеть от дрейфа молоди трески от берегов Исландии, подобного тому, который произошел в 1920-е гг. Возможно, в настоящее время температура вод к западу от Гренландии является достаточно высокой для этого. Действительно, случаи такого дрейфа имели место в 2003 и 2005 гг., однако число особей было небольшим; возможно, это является следствием истощения и омоложения нерестового запаса исландской трески, который не произвел ни одного урожайного поколения на протяжении последних 20 лет (ICES, 2005b).

Ньюфаундленд / Лабрадор

Объемы этого промысла, ведущегося с XVI века, росли до середины XIX века. Между 1920 и 1960 гг. наблюдались колебания ежегодных уловов, а затем они резко выросли, достигнув максимума в 1968 г. Вслед за этим наступил период резкого снижения уловов, который продолжался до 1977 г., когда Канада установила свою 200-мильную исключительную экономическую зону (Rose, 2004). Общий предельно допустимый объем вылова был повышен в середине и конце 1980-х гг., однако вновь снизился после 1989 г. В 1992 г. был введен мораторий на промысел трески (см. рис. 15.5b). Хотя рыболовство было основной причиной упадка популяции (Walters and Maguire, 1996), в конце 1980-х и 1990-х гг. также имели место снижение продуктивности трески и сокращение численности мойвы, составляющей основу ее питания (Rose and O'Driscoll, 2002; Shelton et al., 2006). Кроме того, мораторий на промысел тюленя привел к резкому увеличению численности последнего и, как следствие, повышению уровня смертности его жертв, включая треску (Lilly et al., 2003). Высокий уровень смертности остается основным препятствием для роста популяции. Хотя предполагается, что дальнейшее потепление климата будет благоприятствовать восстановлению запасов трески (Drinkwater, 2005), вероятно, необходимой предпосылкой этого будет увеличение численности мойвы, занимающей основное место в рационе трески.

Исландия / Баренцево море

Несмотря на промысел, относительная устойчивость этих запасов трески высока, поскольку они находятся к югу от полярного фронта, где температура воды благоприятна для данного вида (см. рис. 15.5c, d).

15.4.5. Здоровье и благополучие человека

Воздействие прогнозируемого изменения климата на разные группы населения Арктики может быть понято лишь в контексте взаимосвязанных социальных, культурных, политических и экономических факторов, действующих на эти сообщества (Berner et al., 2005). Однако ощутимое влияние этих процессов на здоровье и благополучие населения Арктики имеет место в настоящем и будет иметь место в будущем. В последнее время был проведен целый ряд исследований, предметом которых были здоровье и благополучие коренного населения Арктики, а также значение изменения условий окружающей среды как фактора, влияющего на здоровье. Настоящий раздел, подготовленный с учетом этих исследований, уделяет особое внимание коренным сообществам как более уязвимым группам населения.

15.4.5.1. Непосредственное влияние изменения климата на здоровье населения Арктики

Предполагается, что часть непосредственных последствий (травм и смертельных случаев) будет результатом воздействия экстремальных температур и погодных явлений. Ожидается, что увеличение количества осадков окажет влияние на частоту и интенсивность таких стихийных бедствий, как сели, лавины и камнепады (Koshida and Avis, 1998). Установлена связь между грозами и повышенной влажностью атмосферного воздуха, с одной стороны, и краткосрочным увеличением частоты респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний – с другой (Kovats et al., 2000). Месснер (Messner, 2005) сообщает об увеличении частоты несмертельных инфарктов миокарда в Швеции при повышении температуры во время положительной фазы Арктического колебания (осцилляции), однако связывает это с изменениями поведения, увеличивающими риск развития атеросклеротических заболеваний. Установлена связь случаев кардиомиопатии (ослабления или изменения структуры сердечной мышцы), наблюдаемых на севере России, с низкими температурами и социальным стрессом (Khasnullin et al., 2000). Жители некоторых арктических регионов сообщают о ранее не наблюдавшихся случаях респираторного стресса в крайне жаркие летние дни (Furgal et al., 2002). Воздействие низких температур приводит к увеличению частоты случаев переохлаждения, некоторых видов травм (например, обморожений), несчастных случаев и заболеваний (сердечно-сосудистой системы, органов дыхания, опорно-двигательного аппарата, кожи) (Hassi et al., 2005). Согласно оценкам, в Финляндии уровень смертности в результате травм и заболеваний, связанных с воздействием низких температур во время холодного сезона, составляет от 2 до 3 тыс. чел. в год. Количество смертей, связанных с холодами, превышает уровень смертности в стране от ряда других причин (например, 400 чел./год, погибающих в автокатастрофах, 100-200 смертей в год, связанных с перегревом). На севере России детская заболеваемость болезнями органов дыхания в 1,5–2 раза превышает среднее значение по стране. Факты позволяют предположить, что потепление в холодный период в арктических регионах приведет к сокращению «избыточной» зимней смертности, прежде всего в результате снижения смертности от сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний (Nayha, 2005). В предположении, что стандарты защиты от холода (в том числе факторы, связанные с индивидуальным поведением) не снизятся, вероятным является и сокращение связанного с холодом травматизма (Nayha, 2005).

15.4.5.2. Косвенное влияние изменения климата на здоровье населения Арктики

Изменение климата приведет также и к ряду более сложных, косвенных воздействий на взаимосвязи человека и окружающей среды в Арктике (Berner et al., 2005). Практически во всех регионах все чаще отмечаются природные явления и условия окружающей среды, нетипичные или экстремальные с точки зрения местного и традиционного знания (см., например, Krupnik and Jolly, 2002). Факты позволяют предположить, что рост травматизма среди жителей Севера, обусловленный «странными» или меняющимися природными условиями, например, необычно тонким ледяным покровом или ранним вскрытием последнего, связан с тенденциями изменения климата (см., например, Lafortune et al., 2004).

Изменение климата в Арктике во время явления Эль-Ниньо – Южное колебание (ENSO) вызвало повышение заболеваемости морских млекопитающих, птиц, рыб и моллюсков. Этот процесс связан с рядом инфекционных заболеваний (например, ботулизм, болезнь Ньюкасла). Можно ожидать, что повышение температуры в результате долгосрочного изменения климата приведет к увеличению частоты заболеваний, которые могут передаваться от животных человеку (Bradley et al., 2005). Многие зоонозные заболевания, резервуаром которых в настоящее время являются арктические животные (например, туляремия у кроликов, а также ондатр, бобров и других грызунов, бешенство у лисиц; Dietrich,1981), могут распространяться при помощи механизмов, зависящих от климатических факторов (например, миграции популяций животных). Аналогичным образом потепление позволит многим видам насекомых – переносчиков инфекционных заболеваний переживать зиму и приведет к их акклиматизации в новых районах. Вследствие этого в арктических регионах могут появиться новые или ранее существовавшие в них заболевания (Parkinson and Butler, 2005). Эта возможность подтверждается такими примерами, как случаи клещевого энцефалита (инфекционное заболевание, поражающее головной мозг) в Швеции (Lindgren and Gustafson, 2001), а также заболевания кольчатой нерпы (*Phoca hispida*) и гренландского кита (*Balaena mysticetus*) в Северном Ледовитом океане, вызванные возбудителями *Giardia spp.* и *Cryptosporidium spp.* (Hughes-Hanks et al., 2005).

Традиционные продукты питания, получаемые из местной окружающей среды, являются фактором культурного и экономического благополучия населения Арктики, а также обеспечивают существенные составляющие его рациона, включая значительную часть потребности в некоторых витаминах (напр., Blanchet et al., 2000). В то же время мясо диких животных и дикорастущие растения являются наиболее значительным источником поступления в организм загрязняющих веществ. Характер поступления многих химических веществ в организм, их переноса и отложения зависит от температуры, вследствие чего потепление климата может косвенным образом повлиять на воздействие этих веществ на здоровье человека (Kraemer et al., 2005). Воздействуя через посредство изменений в доступности и распространении диких видов, изменение климата

в сочетании с другими социальными, культурными, экономическими и политическими тенденциями в арктических сообществах, вероятно, повлияет на рацион населения приполярных областей.

К настоящему времени установлена связь между увеличением доли ввозимых извне продуктов питания в рационе коренных жителей Арктики и ростом частоты сердечно-сосудистых заболеваний, диабета, кариеса и ожирения (Van Oostdam et al., 2003). Для многих коренных сообществ исторически сложившиеся системы обеспечения продовольствием составляют основу традиций, социально-экономического и культурного благополучия. При помощи традиционных практик добычи ресурсов коренные народы поддерживают тесную связь со своей окружающей средой таким образом, который отличает их от некоренных сообществ, и это может вносить существенный вклад в поддержание идентификации того или иного народа с определенной территорией (Gray, 1995; Nuttall et al., 2005).

В то время как изменения, связанные с климатом, представляют угрозу для аспектов продовольственной безопасности некоторых систем натурального хозяйства, повышение температур и сокращение морских льдов расширяют возможности транспортировки и доступа к продовольствию, приобретаемому на внешних рынках. Изменения маршрутов миграции животных также создают возможности для появления в северных регионах новых видов, употребляемых в пищу. Совокупность всех перечисленных факторов наряду с расширением возможностей для земледелия и пастбищного животноводства в связи с наступлением менее суровых зим и удлинением летнего периода вегетации затрудняет прогноз изменений в рационе населения Арктики и соответствующего влияния на его здоровье, даже в том предположении, что мы располагаем достаточными знаниями о том, какие продукты способна обеспечить местная окружающая среда и какие виды деятельности она может поддержать. Также понятно, что эти изменения будут зависеть не только от изменения условий окружающей среды, но и от ряда экономических, технологических и политических факторов.

Приводя к учащению разливов рек и затопления прибрежных территорий, усилению эрозии, учащению засух и деградации многолетней мерзлоты, результатом которых является разрушение водоемов и резервуаров, а также бактериальное загрязнение, изменение климата может представлять угрозу для коммунальной инфраструктуры, в том числе санитарно-гигиенической. Эта угроза наиболее актуальна для населенных пунктов, расположенных на арктическом побережье на небольшой высоте над уровнем моря (например, Шишмарев, Аляска, США; Тактояктук, Северо-Западные территории, Канада). Используемые сообществами источники водоснабжения могут пострадать от вторжения соленых вод и бактериального загрязнения. Количество воды, доступное для удовлетворения базовых гигиенических потребностей, может быть ограничено вследствие засух и повреждения инфраструктуры. Частота заболеваний, вызванных контактом с отходами жизнедеятельности человека, может возрасти вследствие наводнений, повреждения инфраструктуры, например, прудов, используемых для очистки стоков, а также неадекватного уровня гигиены, приводящего к утечкам и распространению сточных вод. В то же время повышение температуры воды может повысить эффективность очистки сточных вод в используемых для этого прудах, отодвинув необходимость расширения местных систем очистки сточных вод по мере роста численности местного населения (Warren et al., 2005).

Совокупность социокультурных, экономических, политических и экологических факторов, действующих в настоящее время на арктические сообщества и внутри этих сообществ (Chapin et al., 2005a), способна оказать серьезное влияние на здоровье и благосостояние населения (Curtis et al., 2005). Изменение физических условий окружающей среды (например, вследствие эрозии и таяния многолетней мерзлоты), представляющее угрозу для конкретных сообществ и ведущее к вынужденному переселению, а также миграция или сокращение численности популяций, затрудняющие доступ к традиционно используемым видам (например, белому медведю как объекту охоты инуитов), способны привести к быстрой и долгосрочной трансформации культуры и утрате традиций. Подобная утрата в свою очередь создает психологический стресс и беспокойство среди населения (Hamilton et al., 2003; Curtis et al., 2005). Однако в большинстве арктических регионов изменение климата представляет собой лишь один из многих факторов трансформации сообществ. В совокупности эти факторы, действующие на сообщества снаружи и изнутри, влияют на процессы аккультурации, обуславливая изменение образа жизни и утрату традиций, способствующих поддержанию социального, культурного и психологического здоровья (Berry, 1997).

Процессы социальной, культурной и экономической трансформации, имевшие место в арктических сообществах на протяжении последних 50 лет, оказывают влияние на все аспекты здоровья в Арктике и с большой вероятностью продолжат оказывать его и в будущем. Вероятно, изменение климата будет служить фактором изменений в местных сообществах, нарушая связи отдельных жителей и сообществ с местной окружающей средой, служащие основой идентичности и культуры арктических народов, а также их социального и физического благополучия (Einarsson et al., 2004; Berner et al., 2005; Chapin et al., 2005a).

15.4.6. Прибрежная зона и малые острова

15.4.6.1. Береговая эрозия в Арктике

Стабильность береговой линии в приполярных областях зависит как от факторов, общих для всех регионов (эрозия, относительное изменение уровня моря, климат и литологические условия), так и от факторов, специфичных для высоких широт (низкие температуры, морские льды, присутствие льда в грунтах и породах). Проблемы эрозии, угрожающие инфраструктуре и культурно значимым объектам, наиболее остро проявляются в районах, где наблюдается повышение уровня моря, потепление в сочетании с сезонным таянием морских льдов или наличие многолетней мерзлоты с высоким содержанием льда (Forbes, 2005). Последняя широко распространена на западе канадской Арктики, на севере Аляски и на значительной части арктического побережья России (см., например, Smith, 2002; Nikiforov et al., 2003). Результатом волновой эрозии и высоких летних температур воздуха является быстрое отступление береговой линии; в некоторых случаях эти процессы вносят существенный вклад в региональное поступление осадочного материала и органического углерода в морскую среду (Aré, 1999; Rachold et al., 2000).

Населенные пункты, расположенные на прочной материнской породе или в зонах гляциоизостатического подъема, в меньшей степени уязвимы для эрозии. Усилению нестабильности береговой линии могут способствовать неадекватные подходы к строительству или промышленному развитию. Например, в таких местах, как Варандей (Российская Федерация), производственная деятельность вызвала усиление эрозии, что привело к разрушению жилых домов и производственных объектов (Ogorodov, 2003). Взаимодействие антропогенных и природных факторов также может способствовать повышению уязвимости для эрозии. Например, в таких населенных пунктах, как Шишмарев (Аляска, США) и Тактояктук (Северо-Западные территории, Канада), сочетание сокращения площади морских льдов, таяния многолетней мерзлоты, штормовых нагонов и действия волн привело к значительной потере собственности, вынудив жителей покинуть или перенести ряд жилых домов и других строений (Instanes et al., 2005). Несмотря на обусловленную культурой привязанность к традиционным местам жительства, подобные изменения могут в конечном счете привести к вынужденному переселению.

Хотя четкие свидетельства увеличения темпов эрозии немногочисленны, было зафиксировано ускорение эрозии между 1954-1970 и 1970-2000 гг. в прибрежной полосе канадского острова Гершеля с очень высоким содержанием льда в грунтах и породах (Lantuit, Pollard, 2003). Результаты моделирования (Rasumov, 2001) позволяют предположить, что темпы эрозии арктического побережья Восточной Сибири могут увеличиться до 3-5 м/год при повышении средней летней температуры воздуха на 3°C. Более того, прогнозируемое сокращение площади морских льдов также может внести вклад в усиление эрозии, как это наблюдалось у поселка Нельсон-Лагун на Аляске (Instanes et al., 2005).

15.4.6.2. Субантарктические острова

В последнее время несколько субантарктических островов испытали значительное влияние изменения климата, что привело к глубоким изменениям, затронувшим как абиотические, так и биотические компоненты окружающей среды (конкретные примеры приведены в гл. 11, разд. 11.2.1. и 11.4.2., табл. 11.1.; гл. 16, разд. 4.4).

15.5. Адаптация: практические подходы, варианты и ограничения

Государства, которым принадлежат арктические регионы, дают значительную часть глобальных выбросов CO_2, а Арктика является важным источником ископаемого топлива. Хотя некоторые группы населения и менее развитые регионы могут вносить очень малый вклад в общие выбросы этих государств, в свете процессов добычи ресурсов и модернизации, развивающихся в приполярных регионах, необходимо рассматривать возможности как смягчения воздействия на климат (снижения выбросов), так и адаптации к меняющимся условиям. Трудности, с которыми сталкивается население арктических регионов, возрастают в результате наблюдаемого и прогнозируемого усиления процессов изменения климата в Арктике, а также возможности исключительно сильных воздействий на окружающую среду. Как и во многих других уязвимых регионах мира, критически важной является адаптация населения, прежде всего, групп, живущих в условиях тесной взаимосвязи с местной окружающей средой.

В прошлом формы культурной адаптации и способность коренного населения Арктики эффективно использовать местные ресурсы были связаны с такими факторами, как сезонные вариации и изменение экологических условий, и формировались под влиянием этих факторов. Одной из отличительных особенностей успешной адаптации является гибкость в применении технологий и социальной организации, а также способность приспособиться к изменению климата, избежав некоторых его негативных последствий, и наличие соответствующих знаний. Группы коренного населения обеспечивают устойчивость к неблагоприятным воздействиям посредством совместного использования ресурсов и обмена ими в родственных «сетях», связывающих охотников с сотрудниками офисов, или даже лицами, занятыми в финансовой сфере. Многие люди гибко организуют свою занятость, часто меняя место работы или сочетая несколько позиций с неполной занятостью (Chapin et al., 2006). В прошлом имели место такие формы реакции на значительные изменения климата или других условий окружающей среды, как изменение размера группы или перемещение в более благоприятную местность, гибкость в отношении сезонных циклов и времени добычи ресурсов, а также формирование механизмов совместного использования ресурсов и групп взаимной поддержки (Krupnik, 1993; Freeman, 1996). Многие из этих стратегий, за исключением групповой мобильности, применяются в различных формах и в настоящее время (см., например, Berkes and Jolly, 2001; Nickels et al., 2002; McCarthy et al., 2005). Однако в будущем возможность или эффективность подобного реагирования может быть ограничена в результате влияния социальных, культурных, экономических и политических факторов, действующих на сообщества извне и изнутри.

Детальное местное знание и социальные институты, обеспечивающие его формирование и передачу, являются критически важными для понимания взаимосвязи между людьми и их средой обитания и, как следствие, для способности сообществ к адаптации (см. раздел 15.6.1). Однако накопление такого знания требует интенсивного взаимодействия с окружающей средой, и по мере того, как меняется характер этого взаимодействия (например, количество времени, проводимое на природе или уделяемое традиционным хозяйственным практикам, периодичность подобной деятельности), меняется и ценность получаемой в результате информации. Изменение местных условий окружающей среды также снижает актуальность традиционного знания и может повысить уязвимость населения перед климатическими и социальными изменениями.

Растущая степень неопределенности и угрозы для продовольственной безопасности увеличивают потребность в гибких системах обеспечения ресурсами, устойчивых к внешним воздействиям. Устойчивость и способность к адаптации зависят как от разнообразия экосистем, так и от институциональных правил, управляющих социальными и экономическими системами (Adger, 2000). Новаторские подходы к комплексному управлению как возобновляемыми, так и невозобновляемыми ресурсами могут содействовать повышению способности к адаптации, предлагая

гибкие стратегии управления и одновременно предоставляя возможности для увеличения местных экономических выгод, а также экологической и социальной устойчивости (Chapin et al., 2004).

Некоторые происходящие изменения предоставляют дополнительные возможности для адаптации. Так, появление на территориях новых видов (см., например, Babaluk et al., 2000; Huntington et al., 2005), увеличение вегетационного периода и дополнительные возможности для ведения сельского хозяйства в высоких широтах способствуют повышению устойчивости местных систем обеспечения продовольствием к неблагоприятным воздействиям. Расширение масштабов экотуризма может создать дополнительные стимулы для охраны экологически значимых территорий. Однако эффективное использование этих потенциально положительных воздействий потребует институциональной гибкости и определенных форм экономической поддержки.

Поскольку экосистемы и население Арктики тесно взаимосвязаны, необходимы широкие стратегии, способные обеспечить одновременную адаптацию в нескольких секторах или сферах жизнедеятельности. Например, подходы, позволяющие местному населению использовать традиционные методы жизнеобеспечения на охраняемых территориях, способствуют сохранению как биоразнообразия, так и целостности традиционной культуры (Chapin et al., 2005a). Создание в критически важных районах охраняемых территорий, например, парков, с гибкими границами для компенсации воздействий изменения климата способствует сохранению дикой природы, а также услуг, предоставляемых этими территориями человеку (например, туризм и рекреация) (Chapin et al., 2005a).

Хотя сообщества многих регионов Арктики демонстрируют значительную устойчивость к неблагоприятным воздействиям и способность к адаптации, некоторые варианты реагирования оказываются неэффективными в силу социально-политических изменений. В настоящее время политическое, культурное и экономическое разнообразие сообществ различных регионов Арктики существенным образом влияет на то, каким образом сообщества испытывают воздействие изменения условий окружающей среды и реагируют на него. Это разнообразие также означает, что конкретный опыт, связанный с изменением климата, его воздействием и реагированием на него может не носить универсального характера. В настоящее время немногое известно о том, как сообщества или отдельные жители, коренные или некоренные, различаются с точки зрения восприятия рисков или возможных путей адаптации тех или иных аспектов образа жизни (например, стратегии добычи ресурсов) к неблагоприятным изменениям. Эффективность местных стратегий адаптации, применяемых в различных районах Арктики, неодинакова, а обширные пробелы в знаниях ограничивают возможности для понимания того, почему одни группы оказываются более уязвимыми для факторов изменений, чем другие, располагающие аналогичными ресурсами и существующие в аналогичных экологических условиях. В конечном счете адекватное понимание адаптации может быть достигнуто лишь в результате лучшего понимания социальной и экономической уязвимости всех групп населения Арктики (Handmer et al., 1999).

15.6. Примеры

15.6.1. Пример: использование традиционного знания для адаптации

Традиционное знание народов Арктики формировалось под исключительно сильным «селекционным» давлением, обусловленным необходимостью выживания на основе существенно варьирующих природных ресурсов в суровых условиях удаленных арктических районов. В этих условиях коренное население выработало обширный массив знаний о связи погодных условий, а также состояния снега и льдов с возможностями для охоты и перемещений, а также доступностью природных ресурсов (Krupnik and Jolly, 2002). Эти системы знаний, представлений и практических методов формировались на основе опыта и с помощью культурных механизмов передавались между членами сообществ, а также между поколениями (Huntington, 1998; Berkes, 1999). Это традиционное знание арктических народов содержит обширный массив информации, способный дополнить научные представления и данные наблюдений, а также внести вклад в формирование целостного представления об окружающей среде, природных ресурсах и культуре (Huntington et al., 2004). В настоящее время растет осознание ценности традиционного знания коренных народов Арктики и увеличиваются масштабы совместных усилий по документированию этого знания. Наконец, это знание является неоценимым ресурсом для формирования стратегий адаптации и управления природными ресурсами в ответ на экологические и другие последствия изменения климата, затрагивающие коренные сообщества (Riedlinger and Berkes, 2001; Krupnik and Jolly, 2002). В частности, это знание демонстрирует, как некоторые сообщества смогли адаптироваться к меняющимся условиям, проявляя гибкость в применении традиционных методов охоты, рыболовства и собирательства.

Свидетельствами успешного формирования и применения подобных знаний являются, например, способность охотников-инуитов прокладывать новые маршруты для охоты и перемещений, несмотря на снижение стабильности и безопасности ледяного покрова (см., например, Lafortune et al., 2004); способность многих коренных групп обнаруживать и добывать животных, изменивших время и маршруты миграции, например, диких гусей и оленей-карибу, а также приобретенная способность обнаруживать и добывать новые виды, появившиеся в данном регионе (напр., Krupnik and Jolly, 2002; Nickels et al., 2002; Huntington et al., 2005); способность определять безопасный морской лед и погоду в среде, характеризующейся все более нетипичными погодными условиями (George et al., 2004); знания и умения, необходимые для промысла морских животных по открытой воде в более позднее время года, характеризующееся другим состоянием морских льдов (Community of Arctic Bay, 2005).

Хотя народы Арктики демонстрируют значительную устойчивость к неблагоприятным воздействиям и способность к адаптации, некоторые варианты реагирования оказываются неэффективными в силу недавних социально-политических изменений. Способность этих народов адаптироваться к существенным изменениям климата в будущем без принципиального ущерба для их культуры и

образа жизни не может рассматриваться как безграничная. Для формирования и применения традиционного знания необходимы активное взаимодействие с окружающей средой, плотные социальные «сети» в сообществах, а также уважение и признание этих форм знания и понимания. Современные тенденции трансформации социальной, экономической и культурной жизни в направлении западных образцов, наблюдаемые в некоторых сообществах, прежде всего среди молодежи, способны нарушить цикл формирования и применения традиционного знания, уменьшив его вклад в обеспечение способности к адаптации.

15.6.2. Пример: арктические мегадельты

На арктическом побережье имеются многочисленные речные дельты. Особенно значительными являются мегадельты рек Лена (44 тыс. км^2) и Маккензи (9 тыс. км^2), образованные крупнейшими реками арктического бассейна Евразии и Северной Америки соответственно. В отличие от крупных дельт других регионов физические процессы и благополучие экосистем в этих мегадельтах в значительной степени определяются криогенными процессами, что делает их особенно уязвимыми для эффектов изменения климата.

В настоящее время рост и размыв морских дельт Арктики существенным образом зависит от защиты побережья, обеспечиваемой прибрежными и припайными морскими льдами (Solomon, 2005; Walsh et al., 2005). Утрата этой защиты вследствие потепления приведет к усилению эрозии, вызванной действием волн и штормовыми нагонами. Усугублению проблем будут способствовать повышение уровня моря, увеличение масштабов ветровых нагонов, связанное с сокращением площади морских льдов, и, возможно, увеличение частоты штормов. Аналогичным образом таяние многолетней мерзлоты и содержащегося в грунтах льда, в настоящее время обеспечивающих консолидацию дельтовых отложений, будет способствовать усилению гидродинамической эрозии морского края дельты и речных берегов. Таяние многолетней мерзлоты на самой дельтовой равнине также приведет к сходным изменениям; например, за накоплением талых вод в результате усиления термокарстовых процессов последует развитие дренажа, связанное с формированием связи между поверхностными и подземными водными системами. Возможно, потепление климата уже стало причиной потери водно-болотных угодий в результате расширения озер в дельте р. Юкон в конце XX века (Coleman and Huh, 2004). Оседание поверхности в результате таяния мерзлоты может также повлиять на масштаб и частоту затопления дельтовых равнин вследствие весенних паводков и штормовых нагонов (Kokelj and Burn, 2005).

Современный водный баланс, а также поступление наносов и биогенных веществ в многочисленные озера дельтовых тундр Арктики в значительной степени зависят от наводнений, возникающих в результате заторов льда во время весенних паводков. Исследования влияния будущего изменения климата на речную дельту в бассейне Маккензи (дельта рек Пис – Атабаска) показывают, что уменьшение толщины льда в сочетании с сокращением весеннего стока приведет к снижению интенсивности наводнений, вызываемых заторами (Beltaos et al., 2006). Эти изменения в сочетании с усилением испарения, вызванного повышением летних температур, приведут к снижению уровня дельтовых озер (Marsh and Lesack, 1996). Во многих арктических регионах объемы летнего испарения уже сейчас превышают количество осадков; поэтому сокращение масштабов заторов может привести к пересыханию дельтовых озер, а также уменьшению поступления наносов и биогенных веществ, которые, как известно, являются критически важным фактором благополучия озерных экосистем (Lesack et al., 1998; Marsh et al., 1999). Успешная стратегия адаптации, уже применявшаяся для предотвращения пересыхания дельтовых озер, состоит в управлении сбросами воды из водохранилищ с целью повышения вероятности заторов льда и связанных с ними наводнений (Prowse et al., 2002).

15.6.3 Пример: Антарктический полуостров – быстрое потепление в нетронутой окружающей среде

Антарктический полуостров, образованный сильно изрезанной горной цепью, высота которой на большей части ее протяженности превышает 2000 м, отличается от остальной территории Антарктиды наличием сезона летнего таяния. Это приводит к образованию в летний период многочисленных изолированных участков, свободных от снега, которые служат местообитаниями для простых биологических сообществ, образуемых примитивными растениями, микроорганизмами и беспозвоночными, а также местами размножения для морских млекопитающих и птиц. Антарктический полуостров характеризуется крайне высокими темпами потепления, в несколько раз превышающими глобальные средние значения (Vaughan et al., 2003; Trenberth et al., 2007). С момента публикации Третьего оценочного доклада (TAR) был достигнут существенный прогресс в понимании причин, а также прямых и косвенных следствий этого потепления.

С момента начала ведения систематических наблюдений в течении 50 лет на полуострове наблюдается быстрый рост среднегодовых температур; на станции Вернадский (бывш. Фарадей) повышение составило более 2,5°C (Turner et al., 2005). На западном побережье полуострова темпы роста весенне-летних температур значительно ниже, чем осенне-зимних, но этого оказалось достаточно для существенного увеличения числа дней с положительной температурой – на 74% (Vaughan et al., 2003). Усиление таяния снегов и льдов привело к масштабным последствиям для окружающей среды и экосистем Антарктического полуострова.

К настоящему времени десять плавучих шельфовых ледников потеряли около 14 тыс. км^2 льда (King, 2003); наблюдается отступление 87% оконечностей ледников (Cook et al., 2005), а также уменьшение сезонного снежного покрова (Fox and Cooper, 1998). Потеря сезонного снежного покрова и льда плавучих ледников не оказывает непосредственного влияния на уровень Мирового океана, однако ускорение движения наземных ледников вследствие потери шельфовых льдов (De Angelis and Skvarca, 2003; Scambos et al., 2004; Rignot et al., 2005), а также увеличение стока талых вод (Vaughan, 2006) вносят вклад в повышение уровня. Если рост летних температур продолжится, масштабы этих эффектов будут расти.

Анализ кернов донных отложений показывает, что современные размеры шельфовых ледников, вероятно, явля-

ются наименьшими, как минимум, за последние 10 тыс. лет (Domack et al., 2005) и определенно наименьшими за последнюю тысячу лет (Pudsey and Evans, 2001; Domack et al., 2003). Это заставляет предположить, что отступление ледников не может быть объяснено циклическими вариациями местного климата, а наблюдаемое в настоящее время потепление является беспрецедентным за последние 10 тыс. лет (Turner et al., 2007). Природа процессов, ведущих к ускоренному потеплению на полуострове, точно не установлена, однако есть основания полагать, что они связаны с атмосферной циркуляцией (van den Broeke and van Lipzig, 2003) и, в частности, с изменениями Антарктического колебания в результате действия антропогенных факторов (Marshall et al., 2004; Marshall et al., 2006). Судя по всему, зимнее потепление на западном побережье полуострова связано также с постоянным отступлением сезонных морских льдов (см. рис. 15.2.; Parkinson, 2002) и потеплением в море Беллинсгаузена (Meredith and King, 2005). По некоторым данным, разрушение озона над Антарктикой в весенний период (антарктическая озоновая дыра) также является одним из факторов изменения климата (Thompson and Solomon, 2002), однако эти выводы оспариваются другими исследователями (Marshall et al., 2004). Следует отметить, что современные модели общей циркуляции (general circulation models, GCM) не дают для полуострова потепления, наблюдавшегося на протяжении 50 лет (King, 2003), что не позволяет делать на основе этих моделей достоверных прогнозов относительно того, продолжится ли быстрое потепление и в будущем.

Продолжение потепления (и особенно повышения летних температур) будет иметь существенные последствия; отступление береговых льдов и сокращение снежного покрова приведет к обнажению пород и многолетнемерзлых грунтов, обеспечивая новые местообитания как для местных, так и для чужеродных видов животных и растений. Однако непосредственные последствия изменения климата для растительного и животного мира полуострова труднопредсказуемы, поскольку соответствующие экосистемы подвергаются действию разнообразных факторов стресса. Например, усиление вредного действия ультрафиолетового излучения вследствие разрушения атмосферного озона и летнего обезвоживания может воздействовать на организмы и экосистемы в направлении, противоположном эффектам потепления (Convey et al., 2002). Кроме того, существует растущая угроза вселения чужеродных видов, поскольку препятствующие этому климатические барьеры ослабевают вследствие смягчения климата, а растущие масштабы антропогенной деятельности создают новые возможности для вселения. Подобные случаи вселения уже имели место на многих субантарктических островах с пагубными последствиями для местных видов (Frenot et al., 2005). Более того, снижение темпов воспроизводства на фоне быстрого изменения климата способно ограничивать возможности для переселения аборигенных видов.

Определенные тенденции наблюдаются на всех трофических уровнях морских экосистем к западу от Антарктического полуострова. Основным фактором этих процессов является сокращение площади и времени жизни морских льдов. Увеличение объема талых ледниковых вод также может быть одним из факторов изменения первичной продуктивности (Smith et al., 2003). Аналогичным образом сокращение площади морских льдов является вероятной причиной резкого изменения баланса между основными потребителями фитопланктона – крилем и сальпами (Atkinson et al., 2004). Сокращение численности криля, вероятно, повлияет на высших хищников (альбатросов, тюленей, китов и пингвинов: популяции последних уже претерпевают изменения (Smith et al., 2003)), но может иметь и гораздо более масштабные и далеко идущие последствия, возможно, влияя даже на потенциал поглощения CO_2 в некоторых частях Южного океана (Walsh et al., 2001).

Глобальную значимость потепления на Арктическом полуострове трудно определить в полной мере, однако основной проблемой является опасность потери уникальных ландшафтов и биоты. Темпы потепления на полуострове, одни из самых высоких, наблюдавшихся где бы то ни было на Земле в недавнее время, являются ярким напоминанием о том, как трудноанализируемые процессы климатической динамики способны приводить к изменению климата в региональном масштабе, а также о сложности воздействия этого изменения на природную среду, в минимальной степени затронутую антропогенной деятельностью.

15.7. Заключение: следствия для устойчивого развития

15.7.1. Экономическая деятельность, инфраструктура и устойчивость в Арктике

Таяние многолетней мерзлоты с высоким содержанием льда может приводить к оседанию и повреждению инфраструктуры, в том числе объектов добычи и транспортировки нефти и газа (Hayley, 2004), а потепление климата приведет к обострению существующих проблем, связанных с оседанием (Instanes et al., 2005). Для оценки этих рисков были выполнены расчеты «индекса мерзлотной опасности» (permafrost hazard index) (см., например, Nelson et al., 2001; Anisimov and Belolutskaia, 2004; Anisimov and Lavrov, 2004; Smith and Burgess, 2004). Результаты расчетов в сочетании с прогнозами динамики климата позволяют предположить, что к середине XXI века на территориях, окружающих Северный Ледовитый океан, образуется состоящая из отдельных участков зона высокого риска, охватывающая населенные пункты, трубопроводы и объекты добывающей индустрии (Nelson et al., 2001). Рассчитанная аналогичным образом зона среднего риска охватывает ряд крупных населенных пунктов (Якутск, Норильск, Воркута), а также значительную часть Транссибирской и Байкало-Амурской железнодорожных магистралей. Однако следует отметить, что разграничение широких эффектов, обусловленных с изменением климата и локального воздействия на многолетнюю мерзлоту, связанного с антропогенной деятельностью на местном уровне, остается серьезной проблемой (Tutubalina and Rees, 2001; Nelson, 2003). Хотя в ряде недавних публикаций в научных изданиях и СМИ частые случаи повреждения инфраструктуры связывались с потеплением климата (напр., Smith et al., 2001; Couture et al., 2003), локальное влияние отопления на расположенную под зданием мерзлоту с высоким содержанием льда может быть с легкостью ошибочно принято за эффект изменения климата. Аналогичным образом в северных населенных пун-

ктах проявляется известный эффект городского теплового острова (напр., Hinkel et al., 2003), который может быть локальным фактором деградации многолетней мерзлоты.

Затраты на восстановление инфраструктуры населенных пунктов, поврежденной в результате таяния многолетней мерзлоты, могут быть значительными (Couture et al., 2000, 2001; Chartrand et al., 2002). Даже здания, специально спроектированные для строительства на мерзлоте, могут быть серьезно повреждены в случае выхода условий окружающей среды за пределы, предусмотренные проектом (Khrustalev, 2000). Водонепроницаемые свойства мерзлоты с высоким содержанием льда учитываются при проектировании полигонов для размещения отходов и объектов хранения загрязняющих веществ (Snape et al., 2003), и ее таяние в таких местах может привести к серьезному загрязнению водных ресурсов и значительным затратам на ликвидацию последствий даже в случае относительно небольших утечек (Roura, 2004). Темпы береговой эрозии в районах многолетней мерзлоты с высоким содержанием льда являются одними из самых высоких в мире, а повышение уровня Мирового океана способно еще более ускорить этот процесс (Brown et al., 2003). Перемещение населенных пунктов, оказавшихся под угрозой, связано с очень высокими затратами. Согласно оценкам, затраты на перенесение поселка Кивалина (Аляска) на новое место, находящееся недалеко от старого, составили бы 54 млн долл. США (U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force, 2003). Однако экономические выгоды для северных сообществ способны скомпенсировать часть затрат. Так, согласно результатам моделирования, ожидается снижение количества энергии, необходимой для отопления в населенных районах Арктики и Субарктики, а также сокращение отопительного периода на величину до одного месяца (Anisimov, 1999).

Замерзшие реки и озера традиционно служили основой для важных транспортных путей в зимний период и обеспечивали доступ к небольшим удаленным поселениям. Уменьшение толщины льда приведет к снижению его грузоподъемности, а сокращение периода ледостава ограничит возможности использования ледовых дорог. На начальных стадиях изменения климата основными методами адаптации будут изменение методов обустройства ледовых дорог, периода их использования и конструкции транспортных средств, однако в долгосрочной перспективе потребуются новые маршруты и методы транспортировки. Там, где имеются незамерзающие водоемы, разумной формой адаптации будет расширение использования водного транспорта. В местностях, находящихся в глубине суши, единственной возможной альтернативой может оказаться строительство всепогодных дорог, сопряженное со значительными затратами (напр., Lonergan et al., 1993; Dore and Burton, 2001). Аналогичные проблемы возникнут в связи с использованием дорог, прокладываемых по морскому льду, главным образом для сообщения с морскими объектами обустройства месторождений и другими морскими сооружениями.

Сокращение летних морских льдов улучшит условия для судоходства в Северо-Западном проходе, а также на Северном морском пути. Согласно прогнозам, к 2050 г. на Северном морском пути будет наблюдаться 125 дней в году с ледовитостью менее 75%, что представляет собой благоприятные условия для навигации торговых судов ледового класса (Instanes et al., 2005). Расширение морского судоходства и увеличение длительности летнего периода создаст благоприятные условия для расширения туризма и научно-исследовательских экспедиций (Instanes et al., 2005), что уже наблюдается в североамериканской Арктике (Eagles, 2004).

Даже в отсутствие изменения климата задача создания жизнеспособного плана устойчивого развития для Арктики была бы чрезвычайно сложной; однако дополнительная неопределенность, связанная с процессами изменения климата, и вероятное усиление этих процессов в Арктике делают масштабы проблемы поистине грандиозными. Описанное выше влияние на инфраструктуру в сочетании с вероятным удлинением вегетационного периода и расширением сельскохозяйственной деятельности, открытием новых морских путей, изменением рыбных запасов, а также изменением экосистем предоставит многочисленные новые возможности для развития экономики арктических регионов. Но одновременно все эти факторы налагают определенные ограничения на развитие, которое может считаться устойчивым, лишь согласуясь с этими ограничениями. Однако в последнее время как со стороны правительств, так и со стороны населения наблюдается все более ясное понимание того, что охрана окружающей среды и устойчивое развитие представляют собой две стороны одной медали (Nuttall, 2000a), а межарктическое сотрудничество развивается, в частности, в рамках такого форума, как Арктический Совет. Членами Совета, к важнейшим целям которого относится обеспечение устойчивого развития в Арктике, являются восемь государств и шесть организаций коренных народов. Недавно Арктический Совет в партнерстве с Международным научным арктическим комитетом осуществил Оценку воздействия изменения климата в Арктике (ACIA, 2005), которая существенно улучшила наше понимание последствий изменения климата для арктических регионов. Данная Оценка может служить ориентиром для аналогичных региональных оценок, а также основой плана устойчивого управления ресурсами Арктики.

15.7.2. Экономическая деятельность и устойчивость в Антарктике

В настоящее время единственными значимыми видами экономической деятельности в Антарктике являются промысел морских биоресурсов и туризм. Летом 2005–2006 гг. Антарктиду посетило 27 тыс. туристов, и масштабы антарктического туризма быстро растут (IAATO, 2006). Многочисленные факторы стресса, связанные с изменением климата и расширением антропогенной деятельности на Антарктическом полуострове, повышают уязвимость местной окружающей среды (см. раздел 15.6.3.), что обусловило необходимость введения строгих правил по обеззараживанию одежды туристов, посещающих Антарктический полуостров (IAATO, 2005).

Однако единственным видом деятельности, связанным с масштабным использованием ресурсов Антарктики, является промысел морских биоресурсов. С 1982 г. промысел в антарктических водах регулируется в рамках Конвенции о сохранении морских живых ресурсов Антарктики (CCAMLR); предельно допустимые объемы вылова устанавливаются с учетом изменения климата. Однако интенсивный промысел в районе архипелага Южная Георгия до вступления Конвенции в силу привел к значительному сокращению запасов

некоторых биоресурсов, которые не восстановилась в полной мере до настоящего момента. Особую озабоченность вызывает нелегальный, нерегулируемый и неучитываемый промысел патагонского клыкача (*Dissostichus eleginoides*), поскольку он, наряду с изменением климата, способен подорвать усилия по устойчивому управлению биоресурсами (Bialek, 2003). Более того, методы, используемые при нелегальном промысле, часто приводят к гибели попадающих в виде прилова животных, в частности, некоторых видов альбатроса и буревестника, в настоящее время находящихся под угрозой исчезновения (Tuck et al., 2001).

15.8. Основные неопределенности и приоритеты исследований

С момента публикации Третьего оценочного доклада (TAR) (Anisimov et al., 2001) и материалов Оценки воздействия изменения климата в Арктике (ACIA, 2005) был достигнут существенный прогресс в изучении полярных систем. К настоящему времени зафиксированы многие изменения, обусловленные действием климатических факторов и предсказанные в TAR. Эти подтверждения наряду с усовершенствованием используемых моделей, новыми данными и более широким использованием традиционного и местного знания позволяют нам с большей уверенностью полагаться на прогнозы будущих изменений в полярных регионах. В то же время сохраняются значительные неопределенности, а суровые условия и удаленность полярных регионов ограничивают возможности сбора данных и означают, что сети наблюдений являются редкими и в большинстве случаев сформированы лишь недавно. Трудности понимания эффектов изменения климата в полярных регионах еще более усугубляются вследствие сложности самих полярных систем и их окружения, присущих им обратных связей и чувствительности к воздействиям, а также их способности переходить в другие равновесные и неравновесные состояния.

После публикации TAR значительные усилия исследователей были сосредоточены на влиянии изменения климата на коренные народы Арктики, и настоящая глава уделяет особое внимание именно этим группам населения. Однако необходимо рассматривать и влияние на более широкие группы населения, в частности экономических воздействий, изучение которых в настоящее время затруднено в силу недостатка информации.

Для преодоления основных неопределенностей необходимы конкретные подходы (см. табл. 15.1.). Проект подробных рекомендаций по будущим исследованиям в Арктике был подготовлен международным сообществом (ICARP II, 2006), «волна» скоординированных исследований в окрестностях обоих полюсов ожидается и в рамках Международного полярного года (2007–2009).

Таблица 15.1. *Основные неопределенности, а также рекомендации по организации научной деятельности для их преодоления*

Неопределенность	Рекомендации и подходы
Обнаружение и прогнозирование изменений в биоразнообразии наземных, пресноводных и морских экосистем Арктики и Антарктики, а также значение этих изменений для использования ресурсов и обратных связей в климатических системах	Повышение детальности климатических прогнозов, увеличение усилий по выявлению и изучению «очагов» воздействия
Совокупное влияние пресноводного стока арктического бассейна, образования/таяния морских льдов, а также таяния ледников и ледовых щитов в Арктике и Антарктике на глобальные процессы в Мировом океане, включая термохалинную циркуляцию	Интеграция гидрологического и криосферного мониторинга, а также исследований в области формирования пресноводных ресурсов и реакции морских систем на изменения
Следствия разнообразия и сложности состояния здоровья населения, а также социально-экономических, культурных и политических условий в арктических регионах; взаимодействия между уровнями в этих системах и их значение для адаптивной способности	Накопление стандартизованных данных по исходному состоянию «человеческих систем» в приполярных регионах; комплексные междисциплинарные исследования; организация исследований уязвимости населения, специфичных для конкретных секторов экономики и регионов
Прогнозные модели антарктических и арктических систем, включающие пороги, экстремальные события, скачкообразные изменения и нелинейные взаимодействия, в особенности связанные с «фазовыми переходами» в результате сокращения компонентов криосферы, а также с нарушением экосистем	Адекватный анализ существующих многолетних рядов данных с целью выявления нелинейных зависимостей; разработка междисциплинарных моделей, позволяющих надежно предсказывать поведение систем с нелинейными зависимостями и обратными связями
Адаптивная способность природных и человеческих систем, позволяющая им приспосабливаться к критическим темпам изменений, а также порогам и «точкам перелома»	Интеграция существующих исследований в области воздействия климата на человека и биологические системы с целью моделирования биологических адаптивных способностей, а также выработки стратегий адаптации для человека

Список литературы

Aanes, R., B.-E. Sæther and N.A. Øritsland, 2000: Fluctuations of an introduced population of Svalbard reindeer: the effects of density dependence and climatic variation. *Ecography*, **23**, 437-443.

Abdalati, W. and K. Steffen, 2001: Greenland ice sheet melt extent: 1979-1999. *J. Geophys. Res*., **106**, 33983-33988.

ACIA, 2005: *Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impacts Assessment.* Cambridge University Press, Cambridge, 1042 pp.

Ackley, S., P. Wadhams, J.C. Comiso and A.P. Worby, 2003: Decadal decrease of Antarctic sea ice extent inferred from whaling records revisited on the basis of historical and modern sea ice records. *Polar Res*., **22**, 19-25.

Adger, W.N., 2000: Social and ecological resilience: are they related? *Prog. Hum. Geog*., **24**, 347-364.

Agnarsson, S. and R. Arnason, 2003: The role of the fishing industry in the Icelandic economy: an historical examination. Working Paper W03:07. Institute of Economic Studies, University of Iceland, Reykjavik, 24 pp.

Ainley, D.G., E.D. Clarke, K. Arrigo, W.R. Fraser, A. Kato, K.J. Barton and P.R. Wilson, 2005: Decadal-scale changes in the climate and biota of the Pacific sector of the Southern Ocean, 1950s to the 1990s. *Antarct. Sci.,* **17**, 171-182.

Albon, S.D., A. Stien, R.J. Irvine, R. Langvatn, E. Ropstad and O. Halvorsen, 2002: The role of parasites in the dynamics of a reindeer population. *P. Roy. Soc. Lond. B*, **269**, 1625-1632.

Anisimov, O., 1999: Impact of changing climate on building heating and air conditioning. *Meteorol. Hydrol*., **6**, 10-17.

Anisimov, O.A. and M.A. Belolutskaia, 2001: Predicting agroclimatic parameters using geographical information system. *Meteorol. Hydrol.*, **9**, 89-98.

Anisimov, O.A. and M.A. Belolutskaia, 2004: Predictive modelling of climate change impacts on permafrost: effects of vegetation. *Meteorol. Hydrol*., **11**, 73-81.

Anisimov, O.A. and C.A. Lavrov, 2004: Global warming and permafrost degradation: risk assessment for the infrastructure of the oil and gas industry. *Technologies of Oil and Gas Industry*, **3**, 78-83.

Anisimov, O., B.B. Fitzharris, J.O. Hagen, B. Jefferies, H.Marchant, F. Nelson, T. Prowse and D. Vaughan, 2001: Polar regions (Arctic and Antarctic). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 801-841.

Anisimov, O.A., S.A. Lavrov and S.A. Reneva, 2005a: Emission of methane from the Russian frozen wetlands under the conditions of the changing climate. *Problems of Ecological Modeling and Monitoring of Ecosystems*,Yu. Izrael, Ed., Hydrometeoizdat, St. Petersburg, 124-142.

Anisimov, O.A., S.A. Lavrov and S.A. Reneva, 2005b: Modelling the emission of greenhouse gases from the Arctic wetlands under the conditions of the global warming. *Climatic and Environmental Changes*, G.V. Menzhulin, Ed., Hydrometeoizdat, St. Petersburg, 21-39.

Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2003: AMAP Assessment 2002: *Human Health in the Arctic*. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, 137 pp.

Aré, F.E., 1999: The role of coastal retreat for sedimentation in the Laptev Sea. *Land–Ocean Systems in the Siberian Arctic*: Dynamics and History, H. Kassens, H.A Bauch, I.A. Dmitrenko, H. Eicken, H.-W. Hubberten, M. Melles, J. Thiede and L.A. Timikhov, Eds., Springer, Berlin, 287-299.

Arora, V.K. and G.J. Boer, 2001: Effects of simulated climate change on the hydrology of major river basins. *J. Geophys. Res*., **106**, 3335-3348.

Atkinson, A., V. Siegel, E. Pakhomov and P. Rothery, 2004: Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, **432**, 100-103.

Atkinson, D.E., 2005: Environmental forcing of the circum-Polar coastal regime. *Geo-Marine Lett*., **25**, 98-109.

Aurela, M., T. Laurila and J.-P. Tuovinen, 2002: Annual CO_2 balance of a subarctic fen in northern Europe: importance of the wintertime efflux. *J. Geophys. Res*., **107**, 4607, doi:10.1029/2002JD002055.

Babaluk, J.A., J.D. Reist, J.D. Johnson and L. Johnson, 2000: First records of sockeye (Oncorhynchus nerka) and pink salmon (O. gorbuscha) from Banks Island and other records of pacific salmon in Northwest Territories, Canada.*Arctic*, **53**, 161-164.

Beerling, D.J., A.C. Terry, P.L. Mitchell, D. Gwynn-Jones, J.A. Lee and T.V. Callaghan, 2001: Time to chill: effects of simulated global change on leaf ice nucleation temperatures of sub-Arctic vegetation. *Am. J. Bot*., **88**, 628-633.

Beilman, D.W. and S.D. Robinson, 2003: Peatland permafrost thaw and landform type along a climatic gradient. *Proc., 8th International Conference on Permafrost*, M. Phillips, S.M. Springman and L.U. Arenson, Eds., A.A. Balkema, Lisse, 61-66.

Beilman, D.W., D.H. Vitt and L.A. Halsey, 2001: Localized permafrost peatlands in western Canada: definition, distributions, and degradation. *Arct. Antarct. Alp. Res*., **33**, 70-77.

Beltaos, S., T. Prowse, B. Bonsal, R. MacKay, L. Romolo, A. Pietroniro and B. Toth, 2006: Climatic effects on ice-jam flooding of the Peace–Athabasca Delta. *Hydrol. Process*., **20**, 4013-4050.

Berezovskaya, S., D.Q. Yang and L. Hinzman, 2005: Long-term annual water balance analysis of the Lena River. *Global Planet. Change*, **48**, 84-95.

Bergstrom, D.M. and S.L. Chown, 1999: Life at the front: history, ecology and change on southern ocean islands. *Trends Ecol. Evol*., **14**, 472-477.

Berkes, F., 1999: *Sacred Ecology: Traditional Ecological Knowledge and Resource Management*. Taylor and Francis, London, 232 pp.

Berkes, F., 2002: Epilogue: making sense of arctic environmental change? *The Earth is Faster Now: Indigenous Observations of Arctic Environmental Change*, I. Krupnik and D. Jolly, Eds., Arctic Research Consortium, Fairbanks, 335-349.

Berkes, F. and D. Jolly, 2001: Adapting to climate change: social-ecological resilience in a Canadian Western Arctic Community. *Conserv. Ecol*., **5**, 18.

Berner, J., C. Furgal, P. Bjerregaard, M. Bradley, T. Curtis, E. De Fabo, J. Hassi, W. Keatinge, S. Kvernmo, S. Nayha, H. Rintamaki and J. Warren, 2005: Human health. *Arctic Climate Impact Assessment*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 863-906.

Berry, J.W., 1997: Immigration, acculturation and adaptation. *Appl. Psychol*., **46**, 5-34.

Betts, A.K. and J.H. Ball, 1997: Albedo over the boreal forest. *J.Geophys. Res*., **102**, 28901-28909.

Betts, R.A., 2000: Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, **408**, 187-190.

Bialek, D., 2003: Sink or swim: measures under international law for the conservation of the Patagonian toothfish in the Southern Ocean. *Ocean Dev. Int. Law*, **34**, 105-137.

Bindoff, N., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quere, S. Levitus, Y. Nojiri, C. Shum, L. Talley and U. Alakkat, 2007: Observations: oceanic climate change and sea level. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 385-432.

Blanchet, C., E. Dewailly, P. Ayotte, S. Bruneau, O. Receveur and B. Holub, 2000: Contribution of selected traditional andmarket foods to the diet of Nunavik Inuit women. *Can. J. Diet. Pract. Res*., **61**, 1-9.

Bochkov, Y.A., 1982: Water temperature in the 0-200 mlayer in the Kola Meridian Section in the Barents Sea, 1900-1981 (in Russian). *Sb. Nauch. Trud. PINRO*, **46**, 113-122.

Bogaart, P.W. and R.T. van Balen, 2000: Numerical modeling of the response of alluvial rivers to Quaternary climatic change. *Global Planet. Change*, **27**, 124-141.

Bogoyavlenskiy, D. and A. Siggner, 2004: Arctic demography. *Arctic Human Development Report (AHDR)*, N. Einarsson, J.N. Larsen, A. Nilsson and O.R. Young, Eds., Steffanson Arctic Institute,Akureyri, 27-41.

Bonan, G.B., D. Pollard and S.L. Thompson, 1992: Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature*, **359**, 716-718.

Both, C., R.G. Bijlsma and M.E. Visser, 2005: Climate effects on timing of spring migration and breeding in a long-distance migrant, the pied flycatcher, *Ficedula hypoleuca. J. Avian Biol*., **36**, 368-373.

Bradley, M.J., S.J. Kutz, E. Jenkins and T.M. O'Hara, 2005: The potential impact of climate change on infectious diseases ofArctic fauna. *International Journal for Circumpolar Health*, **64**, 468-477.

Brown, J., M.T. Jorgenson, O.P. Smith and W. Lee, 2003: Long-termrates of coastal erosion and carbon input, Elson Lagoon, Barrow, Alaska. Proc., *8th International Conference on Permafrost*, M. Phillips, S.M. Springman and L.U.Arenson, Eds., A.A. Balkema, Lisse, 101-106.

Buch, E., S.A. Horsted and H. Hovgaard, 1994: Fluctuations in the occurrence of cod in Greenland waters and their possible causes. *ICES Mar. Sci. Symp*., **198**, 158-174.

Callaghan, T.V., M. Johansson, O.W. Heal, N.R. Sælthun, L.J. Barkved, N. Bayfield, O. Brandt, R. Brooker and Co-authors, 2004: Environmental changes in the North Atlantic region: SCANNET as a collaborative approach for documenting, understanding and predicting changes. *Ambio*, **13**, S39-S50.

Callaghan, T.V., L.O. Björn, Y.I. Chernov, F.S. Chapin III, T.R. Christensen, B. Huntley, R. Ims, M. Johansson, D. Jolly, N.V. Matveyeva, N. Panikov, W.C. Oechel and G.R. Shaver, 2005: Arctic tundra and polar ecosystems. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 243-351.

Carmack, E.C. and R.W. Macdonald, 2002: Oceanography of the Canadian Shelf of the Beaufort Sea: a setting for marine life. *Arctic*, **55**, 29-45.

Chabot, M., 2004: Consumption and standards of living of the Québec Inuit:cultural permanence and discontinuities. *Can. Rev. Sociol. Anthr*., **41**, 147-170. Chapin, F.S., III,G. Peterson, F. Berkes, T.V. Callaghan, P.Angelstam,M.Apps, C. Beier,

C. Bergeron and Co-authors, 2004: Resilience and vulnerability of northern regions to social and environmental change. *Ambio*, **33**, 342-347.

Chapin, F.S., III, M. Berman, T.V. Callaghan, P. Convey, A.-S. Crepin, K. Danell, H. Ducklow, B. Forbes and Co-authors, 2005a: Polar systems. *The Millennium Ecosystem Assessment*, R. Hassan, R. Scholes and N. Ash, Eds., Island Press, Washington, District of Columbia, 717-743.

Chapin, F.S., III, M. Sturm, M.C. Serreze, J.P. McFadden, J.R. Key, A.H. Lloyd, A.D. McGuire, T.S. Rupp and Co-authors, 2005b: Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science*, **310**, 657-660.

Chapin, F.S., III, M. Hoel, S.R. Carpenter, J. Lubchenko, B.Walker, T.V. Callaghan, C. Folke, S.A. Levin, K.-G. Mäler, C. Nilsson, S. Barrett, F. Berkes, A.-S. Crépin, K. Danell and Co-authors, 2006: Building resilience to manage Arctic change. *Science*, **35**, 198-202.

Chartrand, J., K. Lysyshyn, R. Couture, S.D. Robinson and M.M. Burgess, 2002: Digital geotechnical borehole databases and viewers for Norman Wells and Tuktoyaktuk, Northwest Territories. Open File Report, 3912. Geological Survey of Canada, CD-Rom.

Chernov, Y.I. and N.V. Matveyeva, 1997: Arctic ecosystems in Russia. *Ecosystems of the World 3: Polar and Alpine Tundra*, F.E. Wielgolaski, Ed., Elsevier, Amsterdam, 361-507.

Christensen, T.R., T. Johansson, H.J. Akerman, M. Mastepanov, N. Malmer, T. Friborg, P. Crill and B.H. Svensson, 2004: Thawing sub-arctic permafrost: effects on vegetation and methane emissions. *Geophys. Res. Lett*., **31**, L04501, doi: 10.1029/2003GL018680.

Coleman, J.M. and O.K. Huh, 2004: *Major World Deltas: A Perspective from Space*. Coastal Studies Institute, Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana. http://www.geol.lsu.edu/WDD/PUBLICATIONS/introduction.htm.

Community of Arctic Bay, 2005: *Inuit Observations on Climate and Environmental Change: Perspectives from Arctic Bay, Nunavut*. ITK, Nasivvik, NAHO, NTI, Ottawa, 57 pp.

Constable, A.J., W.K. de la Mare, D.J. Agnew, I. Everson and D. Miller, 2000: Managing fisheries to conserve the Antarctic marine ecosystem: practical implementation of the Convention on the Conservation of Antarctic Marine Living Resources (CCAMLR). *ICES J. Mar. Sci*., **57**, 778-791.

Convey, P., P.J.A. Pugh, C. Jackson, A.W. Murray, C.T. Ruhland, F.S. Xiong and T.A. Day, 2002: Response of Antarctic terrestrial microarthropods to long-term climate manipulations. *Ecology*, **83**, 3130-3140.

Cook, A., A.J. Fox, D.G. Vaughan and J.G. Ferrigno, 2005: Retreating glacier-fronts on theAntarctic Peninsula over the last 50 years. Science, 22, 541-544.

Cornelissen, J.H.C., T.V. Callaghan, J.M. Alatalo, A.E. Hartley, D.S. Hik, S.E. Hobbie, M.C. Press, C.H. Robinson and Co-authors, 2001: Global change and Arctic ecosystems: is lichen decline a function of increases in vascular plant biomass? *J. Ecol*., **89**, 984-994.

Corradi, C., O. Kolle, K. Walters, S.A. Zimov and E.-D. Schulze, 2005: Carbon dioxide and methane exchange of a north-east Siberian tussock tundra. *Glob. Change Biol*., **11**, 1910-1925.

Couture, R., S.D. Robinson and M.M. Burgess, 2000: Climate change, permafrost degradation, and infrastructure adaptation: preliminary results from a pilot community study in the MackenzieValley. Geological Survey of Canada, Current Research 2000-B2, 9 pp.

Couture, R., S.D. Robinson and M.M. Burgess, 2001: Climate change, permafrost degradation and impacts on infrastructure: two case studies in the Mackenzie Valley. *Proc., 54th Canadian Geotechnical Conference: An Earth Odyssey*, Calgary, 908-915.

Couture, R., S. Smith, S.D. Robinson, M.M. Burgess and S. Solomon, 2003: On the hazards to infrastructure in the Canadian north associated with thawing of permafrost. *Geohazards 2003: 3rd Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards, Edmonton. Canadian Geotechnical Society*, Alliston, Ontario, 97-104.

Crawford, R.M.M., 2004: Long-term plant survival at high latitudes. *Bot. J. Scotland*, **56**, 1-23.

Crawford, R.M.M., C.E. Jeffree and W.G. Rees, 2003: Paludification and forest retreat in northern oceanic environments. *Ann. Bot. Lond*., **91**, 213-226.

Curran, M.A.J., T.D. van Ommen, V.I. Morgan, K.L. Phillips and A.S. Palmer, 2003: Ice core evidence for Antarctic sea ice decline since the 1950s. *Science*, **302**, 1203-1206.

Curtis, T., S. Kvernmo and P. Bjerregaard, 2005: Changing living conditions, lifestyle and health. *International Journal of Circumpolar Health*, **64**, 442-450.

Dalen, L. and A. Hofgaard, 2005: Differential regional treeline dynamics in the ScandesMountains. *Arct. Antarct. Alp. Res*., **37**, 284-296.

Davis, C.H., L. Yonghong, J.R. McConnell, M.M. Frey and E. Hanna, 2005: Snowfall-driven growth in Antarctic Ice Sheet mitigates recent sea-level rise. *Science*, **308**, 1898-1901.

DeAngelis, H. and P. Skvarca, 2003: Glacier surge after ice shelf collapse. *Science*, **299**, 1560-1562.

de la Mare, W.K., 1997: Abrupt mid-twentieth-century decline inAntarctic sea-ice extent from whaling records. *Nature*, **389**, 57-60.

Derocher,A.E., N.J. Lunn and I. Stirling, 2004: Polar bears in a warming climate. *Integr. Comp. Biol*., **44**, 163-176.

Dietrich, R.A., Ed., 1981: *Alaskan Wildlife Diseases*. Institute of Arctic Biology, University of Alaska, Fairbanks.

Domack, E., A. Leventer, S. Root, J. Ring, E. Williams, D. Carlson, E. Hirshorn, W.Wright, R. Gilbert and G. Burr, 2003: Marine sedimentary record of natural environmental variability. *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives*, E. Domack, A. Leventer, A. Burnett, R. Bindschadler, P. Convey and M. Kirby, Eds., Antarctic Research Series 79, AGU, Washington, District of Columbia, 61-68.

Domack, E., D. Duran, A. Leventer, S. Ishman, S. Doane, S. McCallum, D. Amblas, J. Ring, R. Gilbert and M. Prentice, 2005: Stability of the Larsen B ice shelf on the Antarctic Peninsula during the Holocene epoch. *Nature*, **436**, 681-685.

Doran, P.T., J.C. Priscu, W. Berry Lyons, J.E. Walsh, A.G. Fountain, D.M. McKnight, D.L. Moorhead, R.A. Virginia and Co-authors, 2002: Antarctic climate cooling and terrestrial ecosystem response. *Nature*, **415**, 517-520.

Dore, M. and I. Burton, 2001: *The Costs of Adaptation to Climate Change in Canada: A Stratified Estimate by Sectors and Regions – Social Infrastructure*. Environment Canada, Ottawa, 339 pp.

Dowdeswell, J.A., 2006: Atmospheric science: the Greenland Ice Sheet and global sea-level rise. *Science*, **311**, 963-964.

Downey, D. and T. Fenge, Eds., 2003: *Northern Lights Against POPs: Combating Toxic Threats in the Arctic*. McGill–Queen's University Press, Montreal, 347 pp.

Drinkwater, K.F., 2005: The response of Atlantic cod (Gadus morhua) to future climate change. *ICES J. Mar. Sci*., **62**, 1327-1337.

Duhaime, G., 2004: Economic systems. *The Arctic Human Development Report*, N. Einarsson, J.N. Larsen, A. Nilsson and O.R. Young, Eds., Stefansson Arctic Institute, Akureyri, 69-84.

Dye, D.G., 2002: Variability and trends in the annual snow-cover cycle in northern hemisphere land areas, 1972-2000. *Hydrol. Process*., **16**, 3065-3077.

Dyurgerov, M.B. and C.L. Carter, 2004: Observational evidence of increases in freshwater inflow to the Arctic Ocean. *Arct. Antarct. Alp. Res*., **36**, 117-122.

Eagles, P.F.J., 2004: Trends affecting tourism in protected areas. *Proc., 2nd International Conference on Monitoring and Management of Visitor Flows in Recreational and Protected Areas, Rovaniemi, Finland: Policies, Methods and Tools for Visitor Management*, T. Sievänen, J. Erkkonen, J. Jokimäki, J. Saarinen, S. Tuulentie and E. Virtanen, Eds.,Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 2, 18-26.

Edwards, M. and A.J. Richardson, 2004: Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, **430**, 881-884.

Einarsson, N., J.N. Larsen,A. Nilsson and O.R.Young, Eds., 2004: *Arctic Human Development Report*. Stefansson Arctic Institute,Akureyri, 242 pp.

Ekstrom, G., M. Nettles and V.C. Tsai, 2006: Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes. *Science*, **311**, 1756-1758.

Elmhagen, B., M. Tannerfeldt, P. Verucci and A. Angerbjörn, 2000: The arctic fox (*Alopex lagopus*): an opportunistic specialist. *J. Zool. Soc. Lond*., **251**, 139-149.

Esper, J. and F.H. Schweingruber, 2004: Large-scale treeline changes recorded in Siberia. *Geophys. Res. Lett*., **31**, L06202, doi:10.1029/2003GL019178.

Eugster, W., W.R. Rouse, R.A. Pielke, J.P. McFadden, D.D. Baldocchi, T.G.F. Kittel, F.S. Chapin III and Co-authors, 2000: Land-atmosphere energy exchange in Arctic tundra and boreal forest: available data and feedbacks to climate. *Glob. Change Biol*., **6**, S84-S115.

Euskirchen, S.E., A.D. McGuire, D.W. Kicklighter, Q. Zhuang, J.S. Clein, R.J. Dargaville, D.G. Dye and Co-authors, 2006: Importance of recent shifts in soil thermal dynamics on growing season length, productivity, and carbon sequestration in terrestrial high-latitude ecosystems. *Glob. Change Biol*., **12**, 731-750.

FAUNMAP Working Group, 1996: Spatial response of mammals to late Quaternary environmental fluctuations. *Science*, **272**, 1601-1606.

Flanagan, K.M., E. McCauley and F.J. Wrona, 2006: Freshwater foodwebs control saturation through sedimentation. *Glob. Change Biol*., **12**, 644-651.

Foley, J.A., J.E. Kutzbach, M.T. Coe and S. Levis, 1994: Feedbacks between climate and boreal forests during the Holocene epoch. *Nature*, **371**, 52-54.

Forbes, D.L., 2005: Coastal erosion. *Encyclopedia of the Arctic*, M. Nutall, Ed., Routledge, New York and London, 391-393.

Forchhammer, M. and D. Boertmann, 1993: The muskoxen Ovibos moschatus in north and northeast Greenland: population trends and the influence of abiotic parameters on population dynamics. *Ecography*, **16**, 299-308.

Fowbert, J.A. and R. Smith, 1994: Rapid population increases in native vascularplants in theArgentine Islands, Antarctic Peninsula. *Arct. Alp. Res*., **26**, 290-296.

Fox, A.J. and A.P.R. Cooper, 1998: Climate-change indicators from archival aerial photography of the Antarctic Peninsula. *Ann. Glaciol*., **27**, 636-642.

Fraser, W.R. and E.E. Hoffmann, 2003: A predator's perspective on causal links between climate change, physical forcing and ecosystem response. *Mar. Ecol-Prog. Ser*., **265**, 1-15.

Freeman, M., 1996: Identity, health and social order. *Human Ecology and Health: Adaptation to a Changing World*, M.-L. Foller and L.O. Hansson, Eds., Gothenburg University, Gothenburg, 57-71.

Freeman, M.M.R., 2000: *Endangered Peoples of the Arctic*. Greenwood Press, Connecticut, 278 pp. Frenot, Y., S.L. Chown, J. Whinam, P.M. Selkirk, P. Convey,

M. Skotnicki and D.M. Bergstrom, 2005: Biological invasions in the Antarctic: extent, impacts and implications. Biol. Rev., 80, 45-72.

Frey, K.E. and L.C. Smith, 2005: Amplified carbon release fromvast West Siberian peatlands by 2100. *Geophys. Res. Lett*., **32**, L09401, doi: 10.1029/2004GL022025.

Friborg, T., H. Soegaard, T.R. Christensen, C.R. Lloyd and N.S. Panikov, 2003: Siberian wetlands: where a sink is a source. *Geophys. Res. Lett*., **30**, 2129, doi:10.1029/2003GL017797.

Furgal, C., D. Martin and P. Gosselin, 2002: Climate change and health in Nunavik and Labrador: lessons from Inuit knowledge. *The Earth is Faster Now: Indigenous Observations on Arctic Environmental Change*, I. Krupnik and D. Jolly, Eds., ARCUS, Washington, District of Columbia, 266-300.

Gauthier, G., J.-F. Giroux, A. Reed, A. Béchet and L. Bélanger, 2005: Interactions between land use, habitat use, and population increase in greater snow goose: what are the consequences for natural wetlands? *Glob. Change Biol*., **11**, 856-868.

Gedney, N., P.M. Cox, R.A. Betts, O. Boucher, C. Huntingford and P.A. Stott, 2006: Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, **439**, 835-838.

George, J.C., H.P. Huntington, K. Brewster, H. Eicken, D.W. Norton and R. Glenn, 2004: Observations on shorefast ice dynamics in arctic Alaska and the responses of the Inupiat hunting community. *Arctic*, **57**, 363-374.

Georgievsky, V.Y., I.A. Shiklomanov and A.L. Shalygin, 2005: Climate change impact on the water runoff on Lena river basin. *Challenges of Ecological Meteorology and Climatology*, G.V. Menzhulin, Ed., Nauka, St. Petersburg, 218-232.

Gibson, J.J., T.D. Prowse and D.L. Peters, 2006: Partitioning impacts of climate and regulation on water level variability in Great Slave Lake. *J. Hydrol*., **329**, 196-206.

Gray, A., 1995: The indigenous movement in Asia. *Indigenous Peoples of Asia*, A. Gray, R.H. Barnes and B. Kingsbury, Eds., Association for Asian Studies, Ann Arbor, Michigan.

Grebmeier, J.M., J.E. Overland, S.E. Moore, E.V. Farley, E.C. Carmack, L.W. Cooper, K.E. Frey, J.H. Helle and Co-authors, 2006: Amajor ecosystem shift in the northern Bering Sea. *Science*, **311**, 1461-1464.

Gregory, J.M., P. Huybrechts and S.C.B. Raper, 2004: Climatology: threatened loss of the Greenland ice-sheet. *Nature*, **428**, 616.

Hafrannsóknastofnunin, 2006: *Þættir úr vistfræði sjávar 2005* (*Environmental Conditions in Icelandic Waters 2005*. In Icelandic with English table headings and summaries). Hafrannsóknastofnunin (Marine Research Institute), 36 pp.

Hamilton, L.C., B.C. Brown and R.O. Rasmussen, 2003: West Greenland's cod-toshrimp transition: local dimensions of climate change. *Arctic*, **56**, 271-282.

Handmer, J.W., S. Dovers and T.E. Downing, 1999: Societal vulnerability to climate change and variability. *Mitigation and Adaptation Strategies for Climate Change*, **4**, 267-281.

Harris, C., D. Vonder Mühll, K. Isaksen, W. Haeberli, J.L. Sollid, L. King, P. Holmlund, F. Dramis and Co-authors, 2003: Warming permafrost in European mountains. *Global Planet*. *Change*, **39**, 215-225.

Harris, L., 1990: Independent review of the state of the northern cod stock. Final Report of the Northern Cod Review Panel, Department of Supply and Services, Ottawa, 154 pp.

Hassi, J., M. Rytkonen, J. Kotaniemi and H. Rintimaki, 2005: Impacts of cold climate on human heat balance, performance, illnesses and injuries in circumpolar areas. *International Journal of Circumpolar Health*, **64**, 459-567.

Hayley, D.W., 2004: *Climate Change: An Adaptation Challenge for Northern Engineers*. Association of Professional Engineers, Geologists and Geophysicists of Alberta, Alberta. http://www.apegga.org/members/publications/peggs/web01-04/expert.htm.

Henttonen, H. and H.Wallgren, 2001: Small rodent dynamics and communities in the birch forest zone of northern Fennoscandia. *Nordic Mountain Birch Forest Ecosystems*, F.E. Wielgolaski, Ed., Man and the Biosphere Series. UNESCO, Paris, and Parthenon Publishing Group, New York and London, 261-278.

Hild, C. and V. Stordhal, 2004: Human health and well-being. *Arctic Human Development Report (AHDR)*, N. Einarsson, J.N. Larsen, A. Nilsson, O.R. Young, Eds., Steffanson Arctic Institute, Akureyri, 155-168.

Hinkel, K.M., F.E. Nelson, A.F. Klene and J.H. Bell, 2003: The urban heat island in winter at Barrow, Alaska. *Int. J. Climatol*., **23**, 1889-1905.

Hinzman, L.D., N.D. Bettez, W.R. Bolton, F.S. Chapin, M.B. Dyurgerov, C.L. Fastie, B. Griffith, R.D. Hollister and Co-authors, 2005: Evidence and implications of recent climate change in northernAlaska and otherArctic regions. *Climatic Change*, **72**, 251-298.

Hobbie, J.E., B.J. Peterson, N. Bettez, L. Deegan, J. O'Brien, G.W. Kling and G.W. Kipphut, 1999: Impact of global change on biogeochemistry and ecosystems of arctic Alaska freshwaters. *Polar Res*., **18**, 207-214.

Høgda, K.A., S.R. Karlsen and H. Tømmervik, 2007: Changes in growing season in Fennoscandia 1982-1999. *Arctic-Alpine Ecosystems and People in a Changing Environment*, J.B. Orbaek, R. Kallenborn, I. Tombre, E.N. Hegseth, S. Falk-Petersen and A.H. Hoel, Eds., Springer-Verlag, Berlin, 71-84.

Holland, M.M. and C.M. Bitz, 2003: Polar amplification of climate change in coupled models. *Clim. Dynam*., **21**, 221-232.

Hörnberg, S., 1995: Moose density related to occurrence and consumption of different forage species in Sweden. SLU Institution för Skogstaxering, Umeå. *Rapporter–Skog*, **58l**, 34.

Horsted, S.A., 2000: Areviewof the cod fisheries at Greenland, 1910-1995. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science*, **28**, 1-112.

Howat, I.M., I. Joughin, S. Tulaczyk and S. Gogineni, 2005: Rapid retreat and acceleration of Helheimglacier, east Greenland. *Geophys. Res. Lett*., **32**, L22502, doi:10.1029/2005GL024737.

Hughes-Hanks, J.M., L.G. Rickard, C. Panuska, J.R. Saucier, T.M. O'Hara, R.M. Rolland and L. Dehn, 2005: Prevalence of *Cryptosporidium* spp. and *Giardia* spp. in five marine mammal species. *J. Parasitol*., **91**, 1357-1357.

Huisink, M., J.J.W. DeMoor, C. Kasse and T. Virtanen, 2002: Factors influencing periglacial fluvialmorphology in the northern European Russian tundra and taiga. *Earth Surf. Proc. Land*., **27**, 1223-1235.

Huntington, H., 1998: Observations on the utility of the semi-directive interviewfor documenting traditional ecological knowledge. *Arctic*, **51**, 237-242.

Huntington, H., T.V. Callaghan, S. Fox and I. Krupnik, 2004: Matching traditional and scientific observations to detect environmental change: a discussion on arctic terrestrial ecosystems. *Ambio*, **33**(S13), 18-23.

Huntington, H., S. Foxand Co-authors, 2005: The changing Arctic: Indigenous perspectives. Arctic Climate Impact Assessment, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 61-98.

Huntington, H.P., 1992: *Wildlife Management and Subsistence Hunting in Alaska*. Belhaven Press, London, 177 pp.

Hylen, A., 2002: Fluctuations in abundance of northeast Arctic cod during the 20th century. *100 Years of Science under ICES: Papers from a Symposium held in Helsinki, 1-4 August 2000*, E.D. Anderson, Ed., Marine Science Symposia 215, International Council for the Exploration of the Sea, 543-550.

IAATO, 2005: Update on boot and clothing decontamination guidelines and the introduction and detection of diseases in Antarctic wildlife: IAATO's perspective. Paper submitted by the International Association of Antarctica Tour Operators (IAATO) to the Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM) XXVIII. IAATO, 10 pp. http://www.iaato.org/info.html.

IAATO, 2006: IAATO Overview of Antarctic tourism 2005–2006. Information paper submitted by the International Association of Antarctica Tour Operators (IAATO) to the Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM) XXIX. IAATO, 21 pp. http://www.iaato.org/info.html.

ICARP II, 2006: Science Plan 8: terrestrial and freshwater biosphere and biodiversity. *Proc., 2nd International Conference on Artic Research Planning (ICARP II)*, Copenhagen, 20 pp.

ICES, 2005a: Report of the Arctic Fisheries Working Group, Murmansk, 19-28 April 2005. ICES CM2005/ACFM:20. International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen, 564 pp.

ICES, 2005b: Report of the Northwestern Working Group (NWWG) on 26 April - 5 May 2005. ICES CM2005/ACFM:21. International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen, 615 pp.

ICES, 2006: Report of the Northwestern Working Group (NWWG). ICES CM 2006/ACFM:26. International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen, 612 pp.

Ims, R.A. and E. Fuglei, 2005: Trophic interaction cycles in tundra ecosystems and the impact of climate change. *BioScience*, **554**, 311-322.

Instanes, A., O. Anisimov, L. Brigham, D. Goering, B. Ladanyi, J.O. Larsen and L.N. Khrustalev, 2005: Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 907-944.

Jefferies, R.L., R.H. Drent and J.P. Bakker, 2006: Connecting arctic and temperate wetlands and agricultural landscapes: the dynamics of goose populations in response to global change. *Wetlands and Natural Resource Management*, J.T. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink and D.F. Whigham, Eds., Ecological Studies 190, Springer, Berlin, 293-312.

Jensen, A.S., 1926: Indberetning av S/S Dana's praktisk videndskabelige fiskeriundersøgelser ved Vestgrønland i 1925. *Beretninger og Kundgørelser vedr. Styrelsen af Grønland*, **2**, 291-315.

Jensen, A.S., 1939: Concerning a change of climate during recent decades in the Arctic and Subarctic regions, from Greenland in the west to Eurasia in the east, and contemporary biological and physical changes. *Det. Kgl. Danske Videnskabernes Selskab. Biologiske Medd*., **14**, 1-77.

Jernsletten, J.-L. and K. Klokov, 2002: Sustainable Reindeer Husbandry. University of Tromso, Tromso, 164 pp. http://www.reindeer-husbandry.uit.no/.

Johannessen, O.M., K. Khvorostovsky, M.W. Miles and L.P. Bobylev, 2005: Recent ice-sheet growth in the interior of Greenland. *Science*, **310**, 1013-1016.

Johansson, T., N. Malmer, P.M. Crill, T. Friborg, J.H. Åkerman, M. Mastepanov and T.R. Christensen, 2006: Decadal vegetation changes in a northern peatland, greenhouse gas fluxes and net radiative forcing. *Glob. Change Biol*., **12**, 2352-2369.

Johnson, D., C.D. Campbell, D. Gwynn-Jones, J.A. Lee and T.V. Callaghan, 2002:

Arctic soil microorganisms respond more to long-term ozone depletion than to atmospheric CO_2. *Nature*, **416**, 82-83.

Jones, C.D. and D.C. Ramm, 2004: The commercial harvest of krill in the southwest Atlantic before and during the CCAMLR 2000 Survey. *Deep-Sea Res. Pt. II*, **51**, 1421-1434.

Juday, G.P., V. Barber, P. Duffy, H. Linderholm, S. Rupp, S. Sparrow, E. Vaganov and J. Yarie, 2005: Forests, land management and agriculture. *Arctic Climate Impact Assessment ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 781-862.

Kaplan, J.O., N.H. Bigelow, I.C. Prentice, S.P. Harrison, P.J. Bartlein, T.R. Christensen,W. Cramer, N.V. Matveyeva and Co-authors, 2003: Climate change and Arctic ecosystems. 2. Modeling, paleodata-model comparisons, and future projections. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8171, doi:10.1029/2002JD002559.

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 IPCCAR4 global climate models. *J. Hydrometeorol*., **8**, 571-589.

Khasnullin,V.I., A.M. Shurgaya, A.V. Khasnullina and E.V. Sevostoyanova, 2000: *Cardiomyopathies in the North: Novosibirsk* (in Russian). Siberian Division of Russian Academy of Medical Sciences, Siberia, 222 pp.

Khrustalev, L.N., 2000: On the necessity of accounting for the effect of changing climate in permafrost engineering. *Geocryological Hazards*, L.S. Garagulia and E.D. Yershow, Eds., Kruk Publishers,Moscow, 238-247.

King, J.C., 2003: Antarctic Peninsula climate variability and its causes as revealed by analysis of instrumental records. *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives*. Antarctic Research Series 79, AGU, Washington, District of Columbia, 17-30.

Klein, D., 1989: Subsistence hunting. *Wildlife Production Systems: Economic Utilisation of Wild Ungulates*, R.J. Hudson, K.R. Drew and L.M. Baskin, Cambridge University Press, Cambridge, 96-111.

Klein, D., L.M. Baskin, L.S. Bogoslovskaya, K. Danell, A. Gunn, D.B. Irons, G.P. Kofinas, K.M. Kovacs and Co-authors, 2005: Management and conservation of wildlife in a changingArctic. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*, C. Symon, L.Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 597-648.

Kofinas, G., G. Osherenko, D. Klein and B. Forbes, 2000: Research planning in the face of change: the human role in reindeer/caribou systems. Polar Res., 19, 3-22.

Kokelj, S.V. and C.R. Burn, 2005: Near-surface ground ice in sediments of the Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. *Permafrost Periglac.*, **16**, 291-303.

Korhola, A., S. Sorvari, M. Rautio, P.G. Appleby, J.A. Dearing, Y. Hu, N. Rose, A. Lami and N.G. Cameron, 2002: A multi-proxy analysis of climate impacts on recent ontogeny of subarctic Lake Sannajärvi in Finnish Lapland. *J. Paleolimnol*., **1**, 59-77.

Koshida, G. and W. Avis, Eds., 1998: *Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*.Vol. 7, National Sectoral Issues. Environment Canada, Toronto, 620 pp.

Kovats, R.S., B. Menne, A.J. McMichael, C. Corvalan and R. Bertollini, 2000: Climate change and human health: impact and adaptation. WHO/SDE/OEH/00.4. World Health Organization, Geneva, 48 pp.

Krabill, W., W. Abdalati, E. Frederick, S. Manizade, C. Martin, J. Sonntag, R. Swift, R. Thomas,W. Wright and J. Yungel, 2000: Greenland ice sheet: high-elevation balance peripheral thinning. *Science*, **289**, 428-430.

Krabill, W., E. Hanna, P. Huybrechts, W. Abdalati, J. Cappelen, B. Csatho, E. Frederick, S. Manizade and Co-authors, 2004: Greenland Ice Sheet: increased coastal thinning. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L24402, doi:10.1029/2004GL021533.

Kraemer, L., J. Berner and C. Furgal, 2005: The potential impact of climate change on human exposure to contaminants in the Arctic. *International Journal for Circumpolar Health*, **64**, 498-509.

Krupnik, I., 1993: *Arctic Adaptations: Native Whalers and Reindeer Herders of Northern Eurasia*. University Press of New England, Lebanon, Pennsylvania, 355 pp.

Krupnik, I. and D. Jolly, Eds., 2002: *The Earth is Faster Now: Indigenous Observations of Arctic Environmental Change.* Arctic Research Consortiumof the United States, Fairbanks, Alaska, 356 pp.

Kuhnlein, H.V., O. Receveur and H.M. Chan, 2001: Traditional food systems researchwith Canadian indigenous peoples. *International Journal of Circumpolar Health*, **60**, 112-122.

Kutz, S.J., E.P. Hoberg, J. Nishi and L. Polley, 2002: Development of the musk ox lungworm Umingmakstrongylus pallikuukensis (Protostrongylidae) in gastropods in theArctic. *Can. J. Zool.*, **80**, 1977-1985.

Lafortune, V., C. Furgal, J. Drouin, T.Annanack, N. Einish, B. Etidloie,M. Qiisiq, P. Tookalook and Co-authors, 2004: Climate change in northern Québec: access to land and resource issues. Project report. Kativik Regional Government, Kuujjuaq, Québec.

Laherre, J., 2001: Estimates of oil reserves. *Preprints EMF/IEA/IEW Meeting*, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, 92 pp.

Lantuit, H. and W. Pollard, 2003: Remotely sensed evidence of enhanced erosion during the twentieth century on Herschel Island, Yukon Territory. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*, **443**, 54-59.

Lemke, P., J. Ren, R. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R. Thomas and T. Zhang, 2007: Observations: change in snow, ice and frozen ground. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 337-384.

Lesack, L.F.W., P.Marsh and R.E. Hecky, 1998: Spatial and temporal dynamics of major solute chemistry along Mackenzie Delta lakes. *Limnol. Oceanogr.*, **43**, 1530-1543.

Lewis, E.L., E.P. Jones, P. Lemke, T.D. Prowse and P. Wadhams, 2000: T*he Freshwater Budget of the Arctic Ocean*. Kluwer Academic, Dordrecht, 623 pp.

Lilly, G.R., P.A. Shelton, J. Brattey, N. Cadigan, B.P. Healey, E.F. Murphy, D. Stanbury and N. Chen, 2003: An assessment of the cod stock in NAFO Divisions 2J+3KL in February 2003. 2003/023 Department of Fisheries and Oceans Stock Assessment Secretariat, 157 pp.

Lindgren, E. and R. Gustafson, 2001: Tick-borne encephalitis in Sweden and climate change. *Lancet*, **358**, 16-18.

Lloyd, A.H., T.S. Rupp, C.L. Fastie and A.M. Starfield, 2003: Patterns and dynamics of treeline advance on the Seward Peninsula, Alaska. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8161, doi:10.1029/2001JD000852.

Loeng, H., K. Brander, E. Carmack, S. Denisenko, K. Drinkwater, B. Hansen, K. Kovacs, P. Livingston, F. McLaughlin and E. Sakshaug, 2005: Marine systems. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 453-538.

Lonergan, S., R. Difrancesco and M.-K. Woo, 1993: Climate change and transportation in northern Canada: an integrated impact assessment. *Climatic Change*, **24**, 331-351.

Luckman, A., T.Murray, R. de Lange and E. Hanna, 2006: Rapid and synchronous ice-dynamic changes in East Greenland. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L03503, doi:10.1029/2005GL025428.

MacDonald, G.M., A.A.Velichko, C.V. Kremenetski, C.K. Borisova, A.A. Goleva, A.A. Andreev, L.C. Cwynar, R.T. Riding and Co-authors, 2000: Holocene tree line history and climate change across northern Eurasia. *Quaternary Res.*, **53**, 302-311.

MacDonald, R., T. Harner, J. Fyfe, H. Loeng and T. Weingartner, 2003: Influence of global change on contaminant pathways to, within and from the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme, AMAPAssessment 2002, Oslo, 65 pp.

Malmer, N., T. Johansson, M. Olsrud and T.R. Christensen, 2005: Vegetation, climatic changes and net carbon sequestration. *Glob. Change Biol.*, **11**, 1895-1909.

Marsh, P. and L.F.W. Lesack, 1996: The hydrologic regime of perched lakes in the Mackenzie Delta: potential responses to climate change. *Limnol. Oceanogr.*, **41**, 849-856.

Marsh, P., L.F.W. Lesack and A. Roberts, 1999: Lake sedimentation in the Mackenzie Delta, NWT. *Hydrol. Process.*, **13**, 2519-2536.

Marshall, G.J., P.A. Stott, J. Turner, W.M. Connolley, J.C. King and T.A. Lachlan-Cope, 2004: Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L14205, doi:10.1029/2004 GL019952.

Marshall, G.J., A. Orr, N.P.M. van Lipzig and J.C. King, 2006: The impact of a changing southern hemisphere annular mode on Antarctic peninsula summer temperatures. *J. Climate*, **19**, 5388-5404.

Martin, D., D. Belanger, P. Gosselin, J. Brazeau, C. Furgal and S. Dery, 2005: Climate change, drinking water, and human health in Nunavik: adaptation strategies. Final Report submitted to the Canadian Climate Change Action Fund, Natural Resources Canada, Quebec, 111 pp.

Maslin, M., 2004: *Gas Hydrates: A Hazard for the 21st Century.* Issues in Risk Science 3, Benfield Hazard Research Centre, London, 22 pp.

Matveyeva, N.V. and Y. Chernov, 2000: *Zonation in Plant Cover of the Arctic.* Russian Academy of Sciences, Moscow, 219 pp.

McBean, G., G. Alekseev, D. Chen, E. Førland, J. Fyfe, P.Y. Groisman, R. King, H. Melling, R. Vose and P.H. Whitfield, 2005: Arctic climate: past and present. *Arctic Climate Impacts Assessment (ACIA)*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 21-60.

McCarthy, J.J., M. LongMartello, R. Corell, N. Eckley Selin, S. Fox, G. Hovelsrud-Broda, S.D. Mathiesen, C. Polsky, H. Selin and N.J.C. Tyler, 2005: Climate change in the context of multiple stressors and resilience. *Arctic Climate Impact Assessment (ACIA)*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 945-988.

Mc Clelland, J.W., R.M. Holmes and B.J. Peterson, 2004: Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change. J. *Geophys. Res.*, **109**, D18102, doi:10.1029/2004JD004583.

McDonald, K.C., J.S. Kimball, E. Njoku, R. Zimmermann and M. Zhao, 2004: Variability in springtime thaw in the terrestrial high latitudes: monitoring amajor control on the biospheric assimilation of atmospheric CO2 with spaceborne microwave remote sensing. *Earth Interactions*, **8**, 1-23.

McGuire, A.D., J.S. Clein, J.M. Melillo, D.W. Kicklighter, R.A. Meier, C.J. Vorosmarty and M.C. Serreze, 2000: Modeling carbon responses of tundra ecosys-

tems to historical and projected climate: sensitivity of pan-Arctic carbon storage to temporal and spatial variation in climate. *Glob. Change Biol.*, **6**, S141-S159.

McGuire, A.D., F.S. Chapin III, C. Wirth, M. Apps, J. Bhatti, T.V. Callaghan, T.R. Christensen, J.S. Clein, M. Fukuda, T. Maximov, A. Onuchin, A. Shvidenko and E. Vaganov, 2007: Responses of high latitude ecosystems to global change: potential consequences for the climate system. *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*, J.G. Canadell, D.E. Pataki and L.F. Pitelka, Eds., Springer, London, 297-310.

Meehl, G.H., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kito, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: Global climate projections. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 747-846.

Mehlum, F., 1999: Adaptation in arctic organisms to a short summer season. *The Ecology of the Tundra in Svalbard*, S.A. Bengtsson, F. Mehlumand T. Severinsen, Eds., Norsk PolarinstituttMeddeleser, 161-169.

Meredith, M.P. and J.C. King, 2005: Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic peninsula during the second half of the 20th century. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L19604, doi:10.1029/2005GL024042.

Messner, T., 2005: Environmental variables and the risk of disease. International *Journal for Circumpolar Health*, **64**, 523-533.

Miller, J.R. and G.L. Russell, 2000: Projected impact of climate change on the freshwater and salt budgets of the Arctic Ocean by a global climate model. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1183-1186.

Mokhov, I.I., V.A. Semenov and V.C. Khone, 2003: Estimates of possible regional hydrologic regime changes in the 21st century based on global climate models. *Izvestiya Rossijskoi Academii Nauk (Proceedings of the Russian Academy of Sciences)*, **39**, 130-144.

Morrison, R.I.G., Y. Aubry, R.W. Butler, G.W. Beyresbergen, G.M. Donaldson, C.L. Gratto-Trevor, P.W. Hicklin, V.H. Johnston and R.K. Ross, 2001: Declines in North American shorebird populations. *Wader Study Group Bulletin*, **94**, 34- 38.

Morrison, R.I.G., K.R. Ross and L.J. Niles, 2004: Declines inwintering populations of red knots in southern South America. *Condor*, **106**, 60-70.

Murphy, E.J., A. Clarke, C. Symon and J. Priddle, 1995: Temporal variation in Antarctic sea-ice: analysis of a long term fast ice record from the South Orkney Islands. *Deep-Sea. Res.*, **42**, 1045-1062.

Nakićenović, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T.Y. Jung, T. Kram, E. Lebre la Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T.Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Z. Dadi, Eds., 2000: *Emissions Scenarios: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 599 pp.

Nayha, S., 2005: Environmental temperature and mortality. I*nternational Journal of Circumpolar Health*, **64**, 451-458.

Nellemann, C., L. Kullerud, I. Vistnes, B.C. Forbes, E. Husby, G.P. Kofinas, B.P. Kaltenborn, J. Rouaud and Co-authors, 2001: GLOBIO: globalmethodology for mapping human impacts on the biosphere. UNEP/DEWA/TR.01-3, United Nations Environment Programme, 47 pp.

Nelson, F.E., 2003: (Un)frozen in time. *Science*, **299**, 1673-1675.

Nelson, F.E., O.A. Anisimov and N.I. Shiklomanov, 2001: Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature*, **410**, 889-890.

Nemani, R.R., C.D. Keeling, H. Hashimoto, W.M. Jolly, S.C. Piper, C.J. Tucker, R.B. Myneni and S.W. Running, 2003: Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, **300**, 1560-1563.

Nickels, S., C. Furgal, J. Castelden, P. Moss-Davies, M. Buell, B. Armstrong, D. Dillon and R. Fonger, 2002: Putting the human face on climate change through community workshops. *The Earth is Faster Now: Indigenous Observations of Arctic Environmental Change*, I. Krupnik and D. Jolly, Eds., ARCUS, Washington, District of Columbia, 300-344.

Nikiforov, S.L., N.N. Dunaev, S.A. Ogorodov and A.B. Artemyev, 2003: Physical geographic characteristics. *The Pechora Sea: Integrated Research*. MOPE, Moscow, 502 pp. (In Russian).

Nuttall, M., 2000a: The Arctic is Changing. Stefansson Arctic Institute, Akureyri, 11 pp. http://www.thearctic.is/PDF/The%20Arctic%20is%20changing.pdf.

Nuttall, M., 2000b: Indigenous peoples, self-determination, and the Arctic environment. *The Arctic: Environment, People, Policy*, M. Nuttall and T.V. Callaghan, Eds., Harwood Academic, The Netherlands, 377-409.

Nuttall, M., F. Berkes, B. Forbes, G. Kofinas, T. Vlassova and G. Wenzel, 2005: Hunting, herding, fishing and gathering: indigenous peoples and renewable resource use in the Arctic. *Arctic Climate Impacts Assessment, ACIA*, C. Symon, L.Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 649-690.

Oechel, W.C., G.L.Vourlitis, S.J. Hastings, R.C. Zulueta, L. Hinzman and D. Kane, 2000: Acclimation of ecosystem CO_2 exchange in theAlaskanArctic in response to decadal climate warming. *Nature*, **406**, 978-981.

Ogorodov, S.A., 2003: Coastal dynamics in the Pechora Sea under technogenic impact. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*, **443**, 74-80.

Orr, J.C., V.J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S.C. Doney, R.A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber and Co-authors, 2005: Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, **437**, 681-686.

Paine, R., 1994: *Herds of the Tundra: A Portrait of Saami Reindeer Pastoralism. Smithsonian Institution Press,Washington*, District of Columbia, 242 pp.

Parkinson, A. and J. Butler, 2005: Impact of climate change on infectious diseases in the Arctic. *International Journal for Circumpolar Health*, **64**, 478.

Parkinson, C.L., 2002: Trends in the length of the Southern Ocean sea ice season, 1979-1999. *Ann. Glaciol.*, **34**, 435-440.

Parkinson, C.L., 2004: Southern Ocean sea ice and its wider linkages: insights revealed from models and observations. *Antarct. Sci.*, **16**, 387-400.

Pavlov, A.V. and N.G. Moskalenko, 2002: The thermal regime of soils in the north of western Siberia. *Permafrost Periglac.*, **13**, 43-51.

Pavlov, P., J.I. Svendsen and S. Indrelid, 2001: Human presence in the European Arctic nearly 40,000 years ago. *Nature*, **413**, 64-67.

Payette, S., M. Eronen and J.J.P. Jasinski, 2002: The circumpolar tundra-taiga interface: late Pleistocene and Holocene changes. *Ambio*, **12**, 15-22.

Payne, A.J., A. Vieli, A. Shepherd, D.J. Wingham and E. Rignot, 2004: Recent dramatic thinning of largest West Antarctic ice stream triggered by oceans. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L23401, doi:10.1029/2004GL021284.

Peck, L.S., 2005: Prospects for surviving climate change in Antarctic aquatic species. *Frontiers in Zoology,* **2**, doi:10.1186/1742-9994-2-9.

Peck, L.S., P. Convey and D.K.A. Barnes, 2006: Environmental constraints on life histories in Antarctic ecosystems: tempos, timings and predictability. *Biol. Rev.*, **81**, 75-109.

Peters, D.L., T.D. Prowse, A. Pietroniro and R. Leconte, 2006: Establishing the flood hydrology of the Peace–Athabasca Delta, northern Canada. *Hydrol. Process.*, **20**, 4073-4096.

Peterson, B.J., R.M. Holmes, J.W. McClelland, C.J. Vorosmarty, R.B. Lammers, A.I. Shiklomanov, I.A. Shiklomanov and S. Rahmstorf, 2002: Increasing river discharge to theArctic Ocean. *Science*, **298**, 2172-2173.

Peterson, B.J., J.McClelland, R. Curry, R.M. Holmes, J.E.Walsh and K.Aagaard, 2006: Trajectory shifts in the arctic and subarctic freshwater cycle. *Science*, **313**, 1061-1066.

Pienitz, R.,M. S.V. Douglas and J.P. Smol, 2004: *Long-Term Environmental Change in Arctic and Antarctic Lakes*. Vol. 8. Springer Verlag, 562 pp.

Polyakov, I.V., G.V. Alekseev, R.V. Bekryaev, U. Bhatt, R.L. Colony, M.A. Johnson, V.P. Karklin, A.P. Makshtas, D. Walsh and A.V. Yulin, 2002: Observationally based assessment of polar amplification of global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1878. doi:10.1029/2001GL011111.

Prowse, T.D. and S. Beltaos, 2002: Climatic control of river-ice hydrology: a review. *Hydrol. Process.*, **16**, 805-822.

Prowse, T.D., D.L. Peters, S. Beltaos, A. Pietroniro, L. Romolo, J. Töyrä and R. Leconte, 2002: Restoring ice-jam floodwater to a drying delta ecosystem. *Water Int.*, **27**, 58-69.

Prowse, T.D., F.J. Wrona and G. Power, 2004: Dams, reservoirs and flowregulation. *Threats to Water Availability in Canada*. National Water Resource Institute, Scientific Assessment Report No. 3, Environment Canada, Ottawa, 9-18.

Prowse, T.D., F.J.Wrona, J. Reist, J.J. Gibson, J.E. Hobbie, L.M.J. Levesque and W.F. Vincent, 2006a: Climate change effects on hydroecology of arctic freshwater ecosystems. *Ambio*, **35**, 347-358.

Prowse, T.D., F.J. Wrona, J.D. Reist, J.J. Gibson, J.E. Hobbie, L. Levesque and W.F. Vincent, 2006b: Historical changes in arctic freshwater ecosystems. *Ambio*, **35**, 339-346.

Pudsey, C.J. and J. Evans, 2001: First survey of Antarctic sub-ice shelf sediments reveals mid-Holocene ice shelf retreat. *Geology*, **29**, 787-790.

Quayle,W.C., L.S. Peck, H. Peat, J.C. Ellis-Evans and P.R. Harrigan, 2002: Extreme responses to climate change in Antarctic lakes. *Science*, **295**, 645-645.

Quayle, W.C., P. Convey, L.S. Peck, J.C. Ellis-Evans, H.G. Butler and H.J. Peat, 2003: Ecological responses of maritime Antarctic lakes to regional climate change. *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Palaeoenvironmental Perspectives*, E. Domack, A. Leventer, A. Burnett, R. Bindschadler, P. Convey and M. Kirby, Eds., American Geophysical Union, Washington, District of Columbia, 159-170.

Rachold, V., M.N. Grigoriev, F.E. Aré, S. Solomon, E. Reimnitz, H. Kassens and M. Antonov, 2000: Coastal erosion vs. riverine sediment discharge in the Arctic shelf seas. *Geologisches Rundschau (Int. J. Earth Sci.)*, **89**, 450-460.

Rasumov, S.O., 2001: Thermoerosion modelling of ice-rich Arctic coast in stationary climatic conditions (in Russian). *Kriosfera Zemli*, **5**, 50-58.

Reist, J., F.J. Wrona, T.D. Prowse, M. Power, J.B. Dempson, R. Beamish, J.R. King, T.J. Carmichael and C.D. Sawatzky, 2006a: General effects of climate change effects on arctic fishes and fish populations. *Ambio*, **35**, 370-380.

Reist, J.D., F.J. Wrona, T.D. Prowse, J.B. Dempson, M. Power, G. Koeck, T.J. Carmichael, C.D. Sawatzky, H. Lehtonen and R.F. Tallman, 2006b: Effects of climate change and UV radiation on fisheries for arctic freshwater and anadromous species. *Ambio*, **35**, 402-410.

Reist, J.D., F.J. Wrona, T.D. Prowse, M. Power, J.B. Dempson, J.R. King and R.J. Beamish, 2006c: An overview of effects of climate change on arctic freshwater and anadromous fisheries. *Ambio*, **35**, 381-387.

Richardson, A.J. and D.S. Schoeman, 2004: Climate impact on ecosystems in the northeast Atlantic. *Science*, **305**, 1609-1612.

Riebesell, U., I. Zondervan, B. Rost, P.D. Tortell, R.E. Zeebe and F.M. Morel, 2000: Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO_2. *Nature*, **407**, 364-367.

Riedlinger, D. and F. Berkes, 2001: Contributions of traditional knowledge to understanding climate change in the Canadian Arctic. *Polar Rec.*, **37**, 315-328.

Rignot, E. and P. Kanagaratnam, 2006: Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet. *Science*, **311**, 986-990.

Rignot, E., G. Casassa, S. Gogineni, P. Kanagaratnam, W. Krabill, H. Pritchard, A. Rivera, R. Thomas and D. Vaughan, 2005: Recent ice loss from the Fleming and other glaciers,Wordie Bay, West Antarctic Peninsula. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L07502, doi:10.1029/2004GL021947.

Rinnan, R., M.M. Keinänen, A. Kasurinen, J. Asikainen, T.K. Kekki, T. Holopainen, H. Ro-Poulsen, T.N. Mikkelsen and Co-authors, 2005: Ambient ultraviolet radiation in the Arctic reduces root biomass and alters microbial community composition but has no effects on microbial biomass. *Glob. Change Biol.*, **11**, 564-574.

Robinson, S.A., J. Wasley and A.K. Tobin, 2003: Living on the edge: plants and global change in continental and maritime Antarctica. *Glob. Change Biol.*, **9**, 1681-1717.

Romanovsky, V.E., M. Burgess, S. Smith, K.Yoshikawa and J. Brown, 2002: Permafrost temperature records: indicators of climate change. *EOS Transactions*, **83**, 589-594.

Rose, G.A., 2004: Reconciling overfishing and climate changewith stock dynamics of Atlantic cod (Gadus morhua) over 500 years. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **61**, 1553-1557.

Rose, G.A. and R.L. O'Driscoll, 2002: Capelin are good for cod: can Newfoundland cod stocks recover without capelin? *ICES J. Mar. Sci.*, **5938**, 1026.

Rose, G.A., B. de Young, D.W. Kulka, S.V. Goddard and G.L. Fletcher, 2000: Distribution shifts and overfishing the northern cod (Gadusmorhua): a viewfrom the ocean. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **57**, 644-664.

Roura, R., 2004: Monitoring and remediation of hydrocarbon contamination at the former site of Greenpeace's World Park Base, Cape Evans, Ross Island, Antarctica. *Polar Res.*, **40**, 51-67.

Royal Society, 2005: Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05, The Royal Society, London, 60 pp.

Ruhland, K.M. and J.P. Smol, 2002: Freshwater diatoms from the Canadian arctic treeline and development of paleolimnological inference models. *J. Phycol.*, **38**, 429-264.

Ruhland, K.M., A. Priesnitz and J.P. Smol, 2003: Paleolimnological evidence from diatoms for recent environmental changes in 50 lakes across Canadian Arctic treeline. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **35**, 110-123.

Russell, D.E., G. Kofinas and B. Griffith, 2002: Barren-ground caribou calving ground workshop. Canadian Wildlife Services, Ottawa, 47 pp.

Sakshaug, E., 2003: Primary and secondary production in Arctic seas. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean*, R. Stein and R.W. Macdonald, Eds., Springer, Berlin, 57-81.

Sakshaug, E., A. Bjorge, B. Gulliksen, H. Loeng and F. Mehlum, 1994: Structure, biomass distribution and energetics of the pelagic ecosystem in the Barents Sea: a synopsis. *Polar Biol.*, **14**, 405-411.

Sazonova, T.S., V.E. Romanovsky, J.E. Walsh and D.O. Sergueev, 2004: Permafrost dynamics in the 20th and 21st centuries along the East Siberian transect. *J. Geophys. Res.–Atmos.*, **109**, D01108, doi:10.1029/2003JD003680.

Scambos, T.A., J.A. Bohlander, C.A. Shuman and P. Skvarca, 2004: Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L18402, doi:10.1029/2004GL020670.

Schopka, S.A., 1994: Fluctuations in the cod stock off Iceland during the twentieth century in relation to changes in the fisheries and environment. *ICES Mar. Sci. Symp.*, **198**, 175-193.

Seebacher, F.,W. Davison, C.J. Lowe and C.E. Franklin, 2005: The falsification of the thermal specialization paradigm: compensation for elevated temperatures in Antarctic fishes. *Biol. Lett.*, **1**, 151-154.

Serreze, M.C. and J.A. Francis, 2006: The Arctic amplification debate. *Climatic Change*, **76**, 241-264.

Serreze, M.C., D.H. Bromwich, M.P. Clark, A.J. Etringer, T. Zhang and R. Lammers, 2003: Large-scale hydro-climatology of the terrestrial Arctic drainage system. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8160, doi:10.1029/2001JD000919.

Shelton, P.A., A.F. Sinclair, G.A. Chouinard, R. Mohn and D.E. Duplisea, 2006: Fishing under low productivity conditions is further delaying recovery of Northwest Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **63**, 235-238.

Shepherd, A., D.J. Wingham and E. Rignot, 2004: Warm ocean is eroding West Antarctic Ice Sheet. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L23402, doi:10.1029\2004GL021106.

Shiklomanov, I.A., A.I. Shiklomanov, R.B. Lammers, B.J. Peterson and C.J. Vorosmarty, 2000: The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean. *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*, E.L. Lewis, E.P. Jones, T.D. Prowse and P. Wadhams, Eds., Kluwer Academic, Dordrecht, 281-296.

Sirotenko, O.D., H.V.Abashina and V.N. Pavlova, 1997: Sensitivity of the Russian agriculture to changes in climate, CO_2 and tropospheric ozone concentrations and soil fertility. *Climatic Change*, **36**, 217-232.

Sitch, S., B. Smith, I.C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, J.O. Kaplan, S. Levis,W. Lucht, M.T. Sykes, K. Thonicke and S. Venevsky, 2003: Evaluation of ecosystemdynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Glob. Change Biol.*, **9**, 161-185.

Sitch, S., A.D. McGuire, J. Kimball, N. Gedney, J. Gamon, R. Engstrom, A. Wolf, Q. Zhuang, J. Clein and K.C. McDonald, 2007: Assessing the carbon balance of circumpolar arctic tundra using remote sensing and processmodeling. *Ecol. Appl.*, **17**, 213-234.

Slayback, D.A., J.E. Pinzon, S.O. Los and C.J. Tucker, 2003: Northern hemisphere photosynthetic trends 1982–99. *Glob. Change Biol.*, **9**, 1-15.

Sloan, E.D., Jr, 2003: Fundamental principles and applications of natural gas hydrates. Nature, 426, 353-359.

Smith, L.C., 2000: Time-trends in Russian Arctic river ice formation and breakup: 1917–1994. *Phys. Geogr.*, **21**, 46-56.

Smith, L.C., Y. Sheng, G.M. MacDonald and L.D. Hinzman, 2005: Disappearing Arctic lakes. *Science*, **308**, 1429.

Smith, N.V., S.S. Saatchi and J.T. Randerson, 2004: Trends in high northern latitude soil freeze and thaw cycles from 1988 to 2002. *J. Geophys. Res.*, **109**, D12101, doi:10.1029/2003JD004472.

Smith, O.P., 2002: Coastal erosion in Alaska. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*, **413**, 65-68.

Smith, R.C., W.R. Fraser, S.E. Stammerjohn and M. Vernet, 2003: Palmer longtermecological research on the Antarcticmarine ecosystem. *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives*, E. Domack, A. Leventer, A. Burnett, R. Bindschadler, P. Convey and M. Kirby, Eds., Antarctic Research Series 79, AGU, Washington, District of Columbia, 131-144.

Smith, S.L. and M.M. Burgess, 2004: *Sensitivity of Permafrost to ClimateWarming in Canada*. Geological Survey of Canada Bulletin No. 579, 24 pp.

Smith, S.L., M.M. Burgess and J.A. Heginbottom, 2001: Permafrost in Canada, a challenge to northern development. *A Synthesis of Geological Hazards in Canada*, G.R. Brooks, Ed., Geological Survey of Canada Bulletin 548, 241-264.

Smol, J.P., A.P. Wolfe, H.J.B. Birks, M.S.V. Douglas, V.J. Jones, A. Korhola, R. Pienitz, K. Ruhland and Co-authors, 2005: Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes. *P. Natl Acad. Sci. USA*, **102**, 4397-4402.

Snape, I., M.J. Riddle, D.M. Filler and P.J. Williams, 2003: Contaminants in freezing ground and associated ecosystems: key issues at the beginning of the new millennium. *Polar Rec.*, **39**, 291-300.

Solomon, S.M., 2005: Spatial and temporal variability of shoreline change in the Beaufort-Mackenzie region, Northwest Territories, Canada. *Geo-Marine Lett.*, **25**, 127-137.

Stieglitz, M., S.J. Dery, V.E. Romanovsky and T.E. Osterkamp, 2003: The role of snow cover in the warming of arctic permafrost. Geophys. Res. Lett., 30, 1721, doi:10.1029/2003GL017337.

Stirling, I. and C.L. Parkinson, 2006: Possible effects of climate warming on selected populations of polar bears (Ursus maritimus) in the Canadian Arctic. *Arctic*, **59**, 262-275.

Stirling, I., N.J. Lunn and J. Iacozza, 1999: Long-term trends in the population ecology of polar bears in western Hudson Bay in relation to climate change. *Arctic*, **52**, 294-306.

Stone, J.O., G.A. Balco, D.E. Sugden, M.W. Caffee, L.C. Sass III, S.G. Cowdery and C. Siddoway, 2003: Holocene deglaciation of Marie Byrd Land, West Antarctica. *Science*, **299**, 99-102.

Strathdee, A.T., J.S. Bale, W.C. Block, S.J. Coulson, I.D. Hodkinson and N. Webb, 1993: Effects of temperature on a field population of Acyrthosiphon svalbardicum (Hemiptera: Aphidae) on Spitsbergen. *Oecologia*, **96**, 457-465.

Stroud, D.A., N.C. Davidson, R. West, D.A. Scott, L. Haanstra, O. Thorup, B. Ganter and S. Delany, 2004: Status of migratory wader population in Africa and Western Eurasia in the 1990s. *International Wader Studies*, **15**, 1-259.

Sturm, M., C. Racine and K. Tape, 2001: Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*, **411**, 546-547.

Sturm,M., T. Douglas, C. Racine and G.E. Liston, 2005: Changing snowand shrub conditions affect albedowith global implications. *J. Geophys. Res.*, **110**, G01004, doi:10.1029/2005JG000013.

Syvitski, J.P.M., 2002: Sediment discharge variability in Arctic rivers: implications for a warmer future. *Polar Res.*, **21**, 323-330.

Tannerfeldt, M., B. Elmhagen and A. Angerbjörn, 2002: Exclusion by interference competition? The relationship between red and arctic foxes. *Oecologia*, **132**, 213-220.

Tape, K., M. Sturm and C. Racine, 2006: The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Glob. Change Biol.*, **12**, 686-702.

Thomas, G. and P.R. Rowntree, 1992: The boreal forests and climate. Q. J. Roy. *Meteor. Soc.*, **118**, 469-497.

Thompson, D.W.J. and S. Solomon, 2002: Interpretation of recent southern hemisphere climate change. *Science*, **296**, 895-899.

Thorpe, N., N. Hakongak, S. Eyegetok and the Kitikmeot Elders, 2001: *Thunder on the Tundra: Inuit Qaujimajatuqangit of the Bathurst Caribou*. Generation Printing, Vancouver, 220 pp.

Trenberth, K.E., P.D. Jones, P.G. Ambenje, R. Bojariu, D.R. Easterling, A.M.G. Klein Tank, D.E. Parker, J.A. Renwick and Co-authors, 2007: Observations: surface and atmospheric climate change. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 235-336.

Truong, G., A.E. Palmé and F. Felber, 2007: Recent invasion of themountain birch *Betula pubescens ssp*. tortuosa above the treeline due to climate change: genetic and ecological study in northern Sweden. *J. Evol. Biol.*, **20**, 369-380.

Tuck, G.N., T. Polacheck, J.P. Croxall and H. Weimerskirch, 2001: Modelling the impact of fishery by-catches on albatross populations. *J. Appl. Ecol.*, **38**, 1182-1196.

Turchin, P. and G.O. Batzli, 2001: Availability of food and population dynamics of arvicoline rodents. *Ecology*, **82**, 1521-1534.

Turner, J., S.R. Colwell, G.J. Marshall, T.A. Lachlan-Cope, A.M. Carleton, P.D. Jones, V. Lagun, P.A. Reid and S. Iagovkina, 2005: Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.*, **25**, 279-294.

Turner, J., J.E. Overland and J.E. Walsh, 2007: An Arctic and Antarctic perspective on recent climate change. *Int. J. Climatol.*, **27**, 277-293.

Tutubalina, O.V. and W.G. Rees, 2001: Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Noril'sk (1961–1999). *Cold Reg. Sci. Technol.*, **32**, 191-203.

United States Environmental Protection Agency, 1997: *Need for American Indian and Alaska Native Water Systems*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, District of Columbia.

U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force, 2003: Permafrost, and impacts on civil infrastructure. 01-03 Arctic Research Commission, Arlington, Virginia, 62 pp.

U.S. Geological Survey World Energy Assessment Team, 2000: G*eological Survey World Petroleum Assessment 2000: Description and Results*. U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS-60, multidisc set, version 1.1, USGS.

Usher, M.B., T.V. Callaghan, G. Gilchrist, B. Heal, G.P. Juday, H. Loeng, M.A.K. Muir and P. Prestrud, 2005: Principles of conserving the Arctic's biodiversity. *Arctic Climate Impact Assessment*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 540-591.

van den Broeke, M. and N.P.M. van Lipzig, 2003: Response of wintertime Antarctic temperatures to the Antarctic Oscillation: results from a regional climate model. *Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives*, E. Domack, A. Leventer, A. Burnett, R. Bindschadler, P. Convey and M. Kirby, Eds., Antarctic Research Series 79, AGU, Washington, District of Columbia, 43-58.

Van Oostdam, J., S. Donaldson, M. Feeley, N. Tremblay, D. Arnold, P. Ayotte, G. Bondy, L. Chan and Co-authors, 2003: Toxic substances in the Arctic and associated effects: human health. *Canadian Arctic Contaminants Assessment Report II*. Indian and Northern Affairs Canada, Ottawa, 82 pp.

Van Wijk, M.T., K.E. Clemmensen, G.R. Shaver, M. Williams, T.V. Callaghan, F.S. Chapin III, J.H.C. Cornelissen, L. Gough and Co-authors, 2003: Long term ecosystem level experiments at Toolik Lake, Alaska and at Abisko, northern Sweden: generalisations and differences in ecosystem and plant type responses to global change. *Glob. Change Biol.*, **10**, 105-123.

Vandenberghe, J., 2001: A typology of Pleistocene cold-based rivers. *Quatern. Int.*, **79**, 111-121.

Vandenberghe, J., 2002: The relation between climate and river processes, landforms and deposits during the Quaternary. *Quatern. Int.*, **91**, 17-23.

Vandenberghe, J. and M. Huisink, 2003: High-latitude fluvial morphology: the example of the Usa river, northern Russia. *Paleohydrology: Understanding Global Change*, K.J. Gregory and G. Benito, Eds.,Wiley, Chichester, 49-58.

Vaughan, D.G., 2006: Recent trends in melting conditions on the Antarctic Peninsula and their implications for ice-sheet mass balance. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **38**, 147-152.

Vaughan, D.G., 2007: West Antarctic Ice Sheet collapse: the fall and rise of a paradigm. *Climatic Change*, in press.

Vaughan, D.G., G.J. Marshall, W.M. Connolley, C.L. Parkinson, R. Mulvaney, D.A. Hodgson, J.C. King, C.J. Pudsey and J. Turner, 2003: Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Climatic Change*, **60**, 243-274.

Velicogna, I. and J.Wahr, 2006: Measurements of time-variable gravity showmass loss in Antarctica. *Science*, **311**, 1754-1756.

Vilhjálmsson, H., 1997: Climatic variations and some examples of their effects on the marine ecology of Icelandic and Greenland waters, in particular during the present century. *Rit Fiskideildar*, **15**, 7-29.

Vilhjálmsson, H., A. Håkon Hoel, S. Agnarsson, R. Arnason, J.E. Carscadden, A. Eide, D. Fluharty, G. Hønneland and Co-authors, 2005: Fisheries and aquaculture. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 691-780.

Vlassova, T.K., 2002: Human impacts on the tundra–taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra. *Ambio*, **12**, 30-36.

Walker, M., H. Wahren, L. Ahlquist, J. Alatolo, S. Bret-Harte, M. Calef, T.V. Callaghan, A. Carroll and Co-authors, 2006: Plant community response to experimental warming across the tundra biome. *P. Natl Acad. Sci. USA*, **103**, 1342-1346.

Walsh, J.E., O. Anisimov, J.O.M. Hagen, T. Jakobsson, J. Oerlemans, T.D. Prowse, V. Romanovsky, N. Savelieva, M. Serreze, I. Shiklomanov and S. Solomon, 2005: Cryosphere and hydrology. *Arctic Climate Impacts Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 183-242.

Walsh, J.J., D.A. Dieterle and J. Lenes, 2001: A numerical analysis of carbon dynamics of the Southern Ocean phytoplankton community: the roles of light and grazing in effecting both sequestration of atmospheric CO_2 and food availability to larval krill. *Deep-Sea Res. Pt. I*, **48**, 1-48.

Walter, K.M., S.A. Zimov, J.P. Chanton, D.Verbyla and F.S. Chapin, 2006: Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, **443**, 71-75.

Walters, C. and J.-J.Maguire, 1996: Lessons for stock assessment fromthe northern cod collapse. *Rev. Fish Biol. Fisher*, **6**, 125-137.

Walther, G.R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T.J.C. Beebee, J.M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg and F. Bairlein, 2002: Ecological responses to recent climate change. *Nature*, **416**, 389-395.

Warren, J., J. Berner and J. Curtis, 2005: Climate change and human health: infrastructure impacts to small remote communities in the North. *International Journal of Circumpolar Health*, **64**, 498.

Watt-Cloutier, S., 2004: Presentation to the Senate Committee on Commerce, Science and Transportation. September 15, 2004. Inuit Circumpolar Conference, Washington, District of Columbia. http://commerce.senate.gov/hearings/testimony.cfm?id=1307&wit_id=3815

Weatherhead, B., A. Tanskanen, A. Stevermer, S.B. Andersen, A. Arola, J. Austin, G. Bernhard, H. Browman and Co-authors, 2005: Ozone and ultraviolet radiation. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 151-182.

Whinam, J. and G. Copson, 2006: Sphagnummoss: an indicator of climate change in the sub-Antarctic. *Polar Rec.*, **42**, 43-49.

White, A., M.G.R. Cannel and A.D. Friend, 2000: The high-latitude terrestrial carbon sink: a model analysis. *Glob. Change Biol.*, **6**, 227-245.

Wingham, D.J., A. Shepherd, A.Muir and G.J. Marshall, 2006: Mass balance of the Antarctic ice sheet. *Philos. T. R. Soc. A.*, **364**, 1627-1635.

World Commission on Dams, 2000: *Introduction to Global Change*. Secretariat of the World Commission on Dams, Cape Town, 16 pp.

Wrona, F.J., T.D. Prowse, J. Reist, R. Beamish, J.J. Gibson, J. Hobbie, E. Jeppesen, J. King and Co-authors, 2005: Freshwater ecosystems and fisheries. *Arctic Climate Impact Assessment, ACIA*, C. Symon, L. Arris and B. Heal, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 353-452.

Wrona, F.J., T.D. Prowse, J.D. Reist, J.E. Hobbie, L. Levesque, R.W. Macdonald and W.F. Vincent, 2006a: Effects of ultraviolet radiation and contaminant-related stressors on Arctic freshwater systems. *Ambio*, **35**, 388-401.

Wrona, F.J., T.D. Prowse, J.D. Reist, J.E. Hobbie, L.M.J. Levesque and W. Vincent, 2006b: Climate change effects on Arctic aquatic biota, ecosystem structure and function. *Ambio*, **35**, 359-369.

Yang,D., B.Ye and A. Shiklomanov, 2004a: Discharge characteristics and changes over the Ob River watershed in Siberia. *J. Hydrometeorol.*, **5**, 595-610.

Yang, D., B.Ye and D.L. Kane, 2004b: Streamflow changes over SiberianYenisei River basin. *J. Hydrol.*, **296**, 59-80.

Yang, D.Q., D.L. Kane, L.D. Hinzman, X. Zhang, T. Zhang and H. Ye, 2002: Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4694, doi:10.1029/2002JD002542.

Yoccoz, N.G. and R.A. Ims, 1999: Demography of smallmammals in cold regions: the importance of environmental variability. *Ecol. Bull.*, **47**, 137-144.

Zhang, T.J., O.W. Frauenfeld, M.C. Serreze, A. Etringer, C. Oelke, J. McCreight, R.G. Barry, D. Gilichinsky, D.Q. Yang, H.C. Ye, F. Ling and S. Chudinova, 2005: Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin. *J. Geophys. Res.–Atmos.*, **110**, D16101, doi:10.1029/2004JD005642.

Zhang, X. and J.E. Walsh, 2006: Toward a seasonally ice-covered Arctic Ocean: scenarios from the IPCCAR4 model simulations. *J. Climate*, **19**, 1730-1747.

Zöckler, C., 2005: Migratory bird species as indicators for the state of the environment. *Biodiversity*, **6**, 7-13.

Zwally, H.J., J.C. Comiso, C.L. Parkinson, D.J. Cavalieri and P. Gloersen, 2002: Variability of Antarctic sea ice 1979-1998. *J. Geophys. Res.–Oceans*, **107**, 3041, doi:10.1029/2000JC000733.

Zwally, H.J., M. Giovinetto, J. Li, H.G. Conejo, M.A. Beckley, A.C. Brenner, J.L. Saba and Y. Donghui, 2005: Mass changes of the Greenland and Antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea-level rise: 1992–2002. *J. Glaciol.*, **51**, 509-527.

WWF

for a living planet®

Данная реклама является бесплатной

Лёд тает не только в твоём коктейле!

Узнай о состоянии льда в Арктике на сайте www.wwf.ru/climate

Отправь SMS **PANDA** на номер **7050** * - мы перезвоним и расскажем как помочь работе WWF России по сохранению белого медведя.

www.wwf.ru

* Стоимость услуги 15 руб