
3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ И ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ В XXI ВЕКЕ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА

3.1. ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ О БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЭТИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Ведущие авторы: Ю. А. Израэль, Г. Э. Инсаров
Авторы: М. Д. Ананичева, О. А. Анисимов, Ю. А. Анохин, Л. И. Болтнева, Е. А. Ваганов, А. Н. Золотокрылин, Н. В. Кобышева, А. Н. Кренке, П. М. Лурье, А. А. Минин, Б. А. Ревич, В. А. Семенов, О. Д. Сиротенко, Ф. С. Терзиев, В. Ч. Хон, Н. М. Чебакова, Б. Г. Шерстюков, И. А. Шикломанов, В. В. Ясюкевич

Редактор-рецензент: Г. В. Груза

3.1.1. Общая характеристика

При наличии точных сведений о климате будущего для оценки последствий его изменений можно было бы использовать те же методы, что и для фактических, произошедших изменений. Однако такой точной информацией нет и, более того, ее быть не может. Если удовлетворительный прогноз погоды возможен на срок до 5–7 дней, то более долговременные предсказания существенно менее надежны даже в пределах одного года. Это справедливо для естественных изменений климата, но неопределенность долговременных предсказаний становится еще больше, если включать в рассмотрение антропогенные факторы. Ведь антропогенное воздействие на глобальный климат осуществляется путем дополнительной эмиссии парниковых газов (ПГ), а они, в свою очередь, зависят от технологий, состояния мировой экономики и т. д. Эти процессы еще менее предсказуемы, чем естественные изменения климата, которые управляются в основном орбитальными и солнечными факторами. Поэтому информация о климате будущего может быть получена лишь при

определенных предположениях о том, как будут протекать базовые климатические и социально-экономические процессы, т. е. в рамках некоторых сценариев.

Даже в рамках заданного сценария информация о значениях гидрометеорологических величин в конкретный момент времени в отдаленном будущем не может быть сколько-нибудь надежной в прогностическом смысле из-за известной стохастичности динамики климатической системы Земли. Она присуща и социально-экономическим процессам. Можно пытаться получить лишь перспективные оценки вероятностных распределений параметров климата в рамках заданного сценария.

Заметим, что в силу нелинейности (в подавляющем большинстве случаев) зависимостей изменение климата — эффект для оценки последствий изменений климата в будущем нужна именно такая достаточно детальная информация. Например, нужны сведения о вероятностных распределениях экстремальных значений метеорологических величин, о длительности периодов экстремально высоких и низких значений и о самих значениях в эти периоды, о характеристиках годового хода средне-суточной температуры и т. д. Информации лишь о средних значениях недостаточно.

Представления о климате будущего, используемые в данном докладе для оценки последствий его изменения по сравнению с климатом настоящего или прошлого или же при сопоставлении двух периодов времени в будущем, можно разделить на две основные группы:

— исследовательские предположения, т. е. принимаемые экспертом для оценки последствий

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

в каком-либо конкретном случае (например, увеличение средней температуры на столько-то градусов по сравнению с современной);

— предположения об изменении климата, полученные в рамках заданного сценария мирового социально-экономического развития, которому соответствуют определенные глобальные антропогенные эмиссии парниковых газов в атмосферу; такая “траектория” эмиссий, поданная на вход выбранной модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), позволяет вычислить будущие концентрации ПГ в атмосфере и соответствующий климат будущего.

Еще раз отметим, что во втором случае предположение о климате будущего есть результат выбора сценария мирового социально-экономического развития, определяющего траекторию эмиссий ПГ, и расчетной МОЦАО (а в силу стохастичности климата — еще и конкретного “прогона” модели).

Для учета неопределенностей, связанных с глобальным социально-экономическим развитием в будущем, Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) организовала разработку разных сценариев и оценку соответствующих траекторий эмиссий климатически активных веществ, прежде всего парниковых газов. В 2000 г. был выпущен Специальный доклад по сценариям эмиссий — Special Report on Emission Scenarios — SRES. В нем были предложены 4 “основные сюжетные линии” (storyline), в которых будущий мир качественно описывался по-разному (далее — “основные линии”). Эти 4 основные линии породили четыре семейства сценариев: A1, A2, B1 и B2. Опишем их кратко, следуя (Special Report on Emission Scenarios, 2000, pp. 4–5).

A1. Основная линия и сценарии этого семейства предполагают быстрый экономический рост, быстрое внедрение новых эффективных технологий, а также рост народонаселения до середины XXI столетия и последующее его уменьшение. Основными чертами развития будут существенное уменьшение региональных различий в доходах на душу населения, усиление культурных и социальных взаимодействий, а также создание новых возможностей. Сценарии этого семейства делятся на три группы, различающиеся по энергетическому “акценту”: A1FI — интенсивное использование ископаемого топлива, A1T — интенсивное использование иных видов топлива, A1B — сбалансированное использование всех видов топлива.

A2. Основная линия и сценарии этого семейства описывают весьма неоднородный мир. Регионы (и страны) ориентируются на свои силы, на сохранение местных особенностей. Темпы рождаемости в разных регионах сближаются очень медленно, что приводит к продолжению роста населения планеты. Экономическое развитие будет в ос-

новном регионально ориентированным, а рост подушного дохода и технологические изменения будут более фрагментированными, чем для других семейств сценариев.

B1. Основная линия и сценарии этого семейства описывают такой же конвергирующий мир с такой же динамикой народонаселения, как и основная линия семейства A1. Однако при этом предполагаются быстрые изменения в экономической структуре в пользу обслуживающего и информационного компонентов при сокращении материалоемкости и при внедрении чистых и ресурсосберегающих технологий. Упор будет делаться на глобальных решениях экономических и социальных проблем, на поддержании окружающей среды в устойчивом состоянии, включая меры по улучшению положения в области равноправия (регионов, стран). При этом новых инициатив в области регулирования климата не предполагается.

B2. Основная линия и сценарии этого семейства описывают мир, в котором упор делается на локальных решениях в области поддержания устойчивости экономики, социальной сферы и окружающей среды. Глобальное народонаселение будет неуклонно увеличиваться с темпом меньшим, чем для A2. Темп развития экономики будет средним. Изменения в технологиях будут более медленными и более разнообразными, чем для основных линий семейств B1 и A1. Хотя сценарии этого семейства также направлены на защиту окружающей среды и социальную справедливость, они ориентируются в этом отношении на региональные уровни.

На основе этих качественных, словесных описаний будущего мира шестью группами специалистов в области математического моделирования были разработаны сорок сценариев, дающих разные траектории эмиссий климатически активных веществ в атмосферу. Разработчики считают, что все эти сценарии являются одинаково обоснованными. Если бы каждому из сценариев была приписана, пусть субъективно, вероятность его реализации, их можно было бы использовать для построения вероятностного прогноза климата XXI века. Однако никаких конкретных вероятностей определено не было. Поэтому разброс оценок эмиссий, а после соответствующего модельного пересчета и концентраций ПГ и параметров климата в будущем невозможно интерпретировать в вероятностных терминах, в частности говорить о надежности прогноза.

Разброс оценок достаточно велик. На рис. 3.1.1 изображены траектории антропогенных эмиссий диоксида углерода, метана, закиси азота и диоксида серы для шести сценариев, представленных в SRES. Это — так называемые “иллюстративные сценарии”. Они включают сценарии-маркеры

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

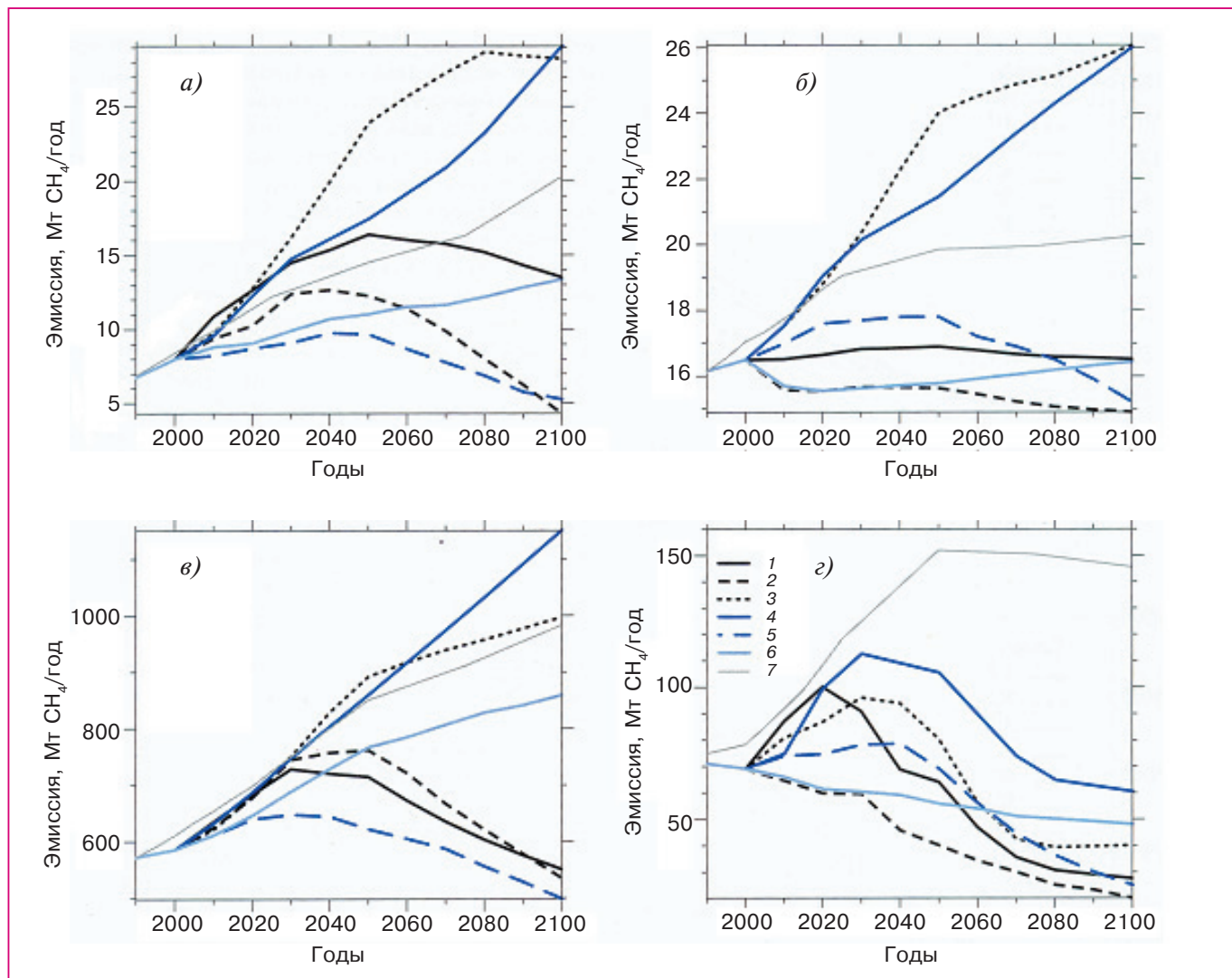


Рис. 3.1.1. Траектории антропогенных эмиссий CO_2 (а), N_2O (б), CH_4 (в) и SO_2 (г) в XXI веке, соответствующие шести иллюстративным SRES-сценариям A1B (1), A1T (2), A1FI (3), A2 (4), B1 (5), B2 (6). Для сравнения показан сценарий IS92a (7) (Climate Change 2001, 2001, р. I-65).

(marker scenario), отражающие основные черты четырех групп сценариев A1B, A2, B1 и B2, а также два дополнительных для групп A1FI и A1T. Рисунок 3.1.1 показывает, что к 2100 г. эмиссии, соответствующие разным сценариям, могут отличаться в несколько раз, а то и на порядок и более.

Следует заметить, что термин “иллюстративный”, не очень удачный здесь в его русском значении в контексте сценариев эмиссий, не надо воспринимать как “искусственный”. Напротив, иллюстративные сценарии количественно выражают самую суть тех предположений, которые были сделаны при словесном описании основных “сюжетных линий” соответствующих групп сценариев.

Такие значительные различия в траекториях эмиссий неизбежно порождают существенное расхождение траекторий концентраций, особенно в

конце рассматриваемого периода времени — в 2100 г., что, в свою очередь, приводит к существенным различиям в климате. На рис. 3.1.2 приведены соответствующие траектории концентраций для CO_2 , CH_4 и N_2O , а на рис. 3.1.3 представлены соответствующие изменения средней температуры земной поверхности. Как легко видеть, разброс значений в конце XXI века весьма значительный.

Обратим внимание на вертикальные отрезки, изображенные в правой части рис. 3.1.3. Они указывают на разброс значений температуры, который возникает при использовании одного и того же сценария эмиссий, который обрабатывается разными климатическими моделями. Это — естественно-научная составляющая неопределенности. МГЭИК специально отмечает, что до 2100 г. диапазон температуры, получающийся при использо-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

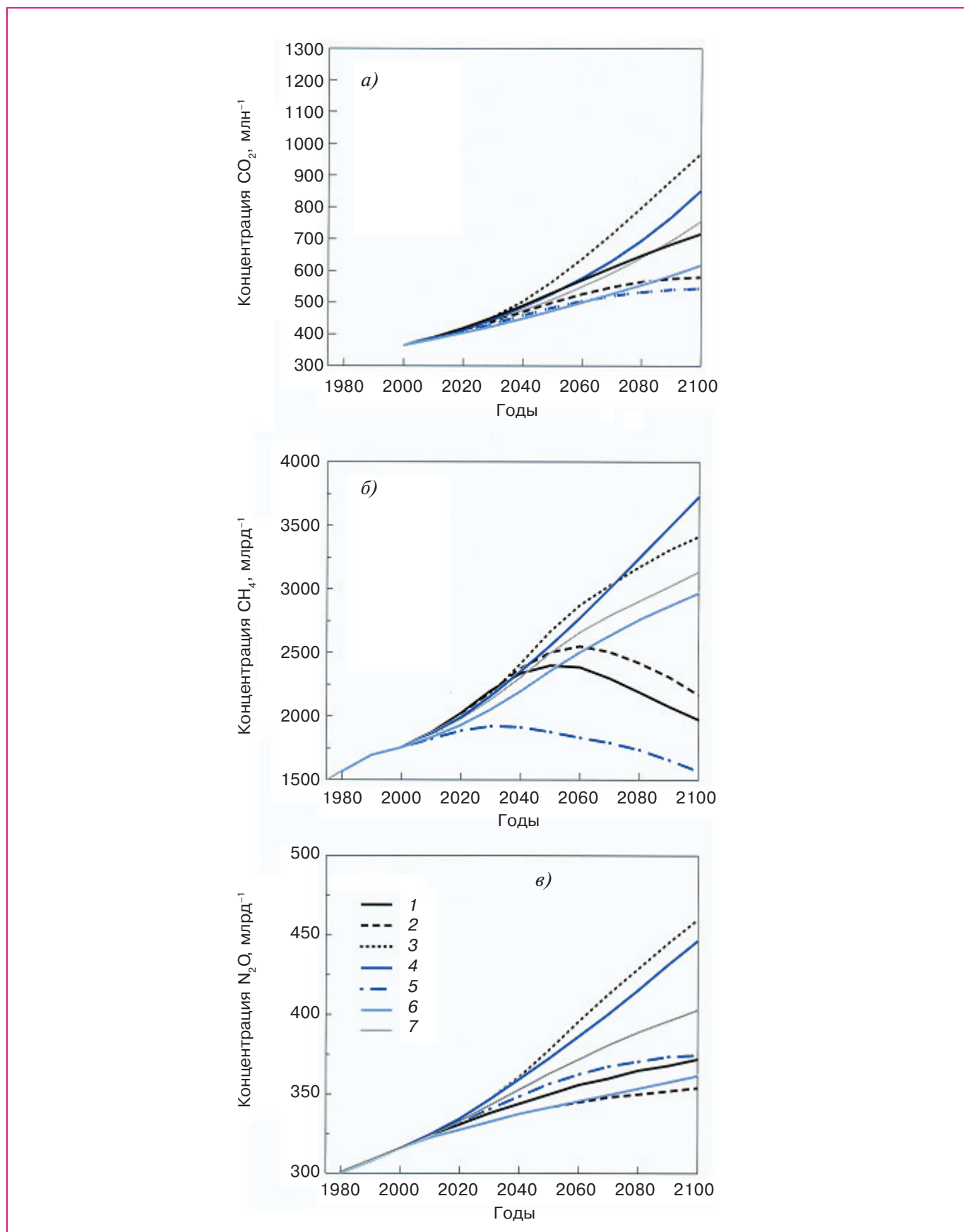


Рис. 3.1.2. Траектории концентраций для CO_2 (а), CH_4 (б) и N_2O (в), соответствующие сценариям А1В (1), А1Т (2), А1F1 (3), А2 (4), В1 (5), В2 (6) и IS92a (7) (Climate Change 2001, 2001, р. I-66).

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

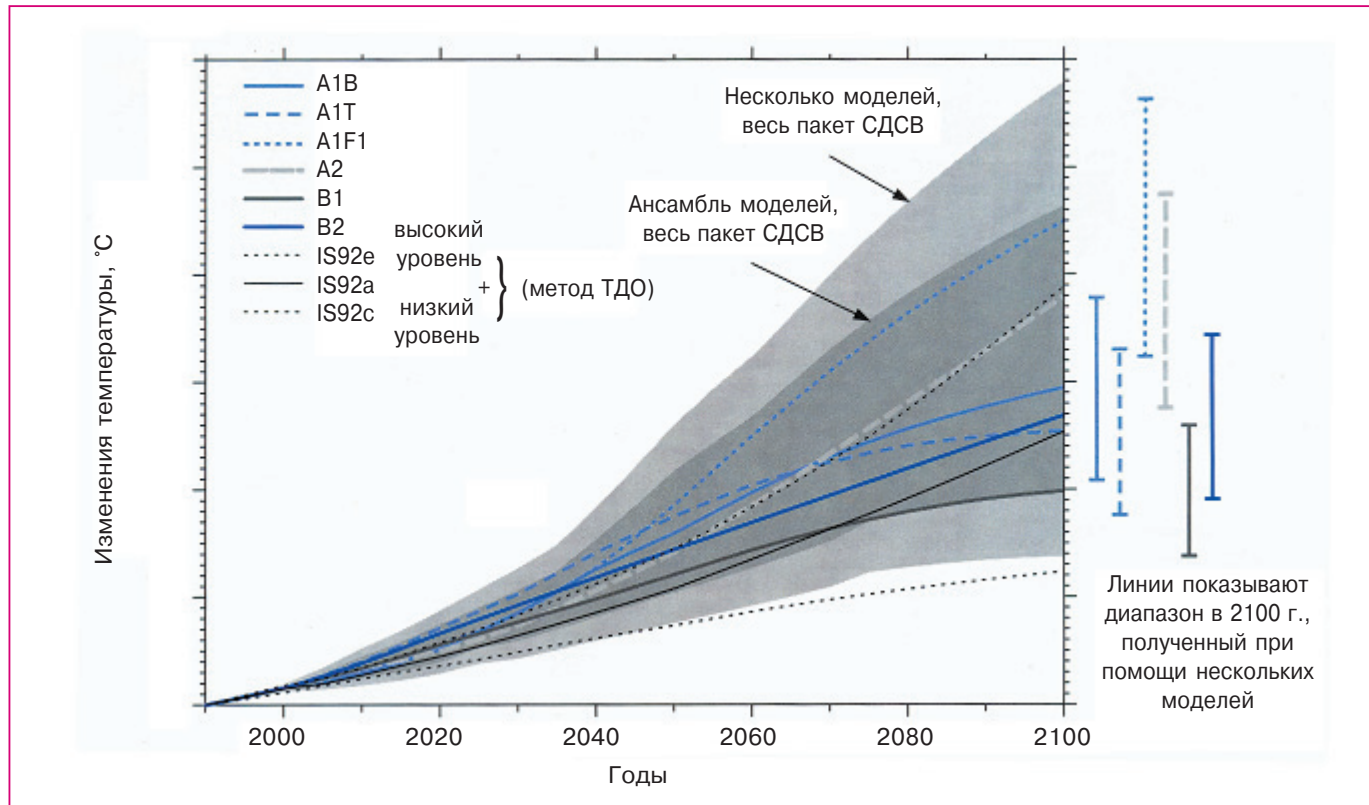


Рис. 3.1.3. Траектории глобальной средней температуры в приповерхностном слое, соответствующие сценариям A1B, A1T, A1F1, A2, B1, B2, IS92a, IS92b и IS92c (Climate Change 2001, 2001a, p. 1–71).

вании какого-либо одного сценария и разных климатических моделей, примерно равен диапазону температуры, получающемуся при разных сценариях при использовании какой-либо одной климатической модели.

Кроме изменений климата, соответствующих сценариям SRES, часто рассматриваются сценарии, относящиеся не к эмиссиям, а к концентрациям ПГ. Например, задается рост концентрации ПГ на заданный процент в год.

Все описанные выше сценарии антропогенного воздействия на глобальный климат — так называемые “неполитические” (non-climate policy scenarios), т. е. в их основе лежат предположения о мировом социально-экономическом развитии без каких-либо специальных мер по регулированию антропогенного воздействия на глобальный климат. Сейчас внимание экспертов все более переключается на “политические” сценарии (climate-policy scenarios). Они обычно исходят из такого регулирования глобальной антропогенной эмиссии парниковых газов, которое приводит к ограничению роста их концентраций в атмосфере или даже к их уменьшению, см., например, (Wigley et al., 1996; Семенов, 2004; Wigley, 2004; Izrael and Semenov, 2006). Однако в данном докладе они рассматриваться не будут.

МОЦАО подразделяются на модели минимальной сложности (minimal complexity models), средней сложности (reduced complexity models) и полномасштабные. Сложность моделей нарастает по мере увеличения детальности описания модельными переменными процессов, происходящих в климатической системе Земли. В том числе увеличивается временное и пространственное разрешение этого описания. В табл. 3.1.1 приведены те полномасштабные МОЦАО, которыми наиболее часто сейчас пользуются исследователи для расчетов параметров климата будущего. На веб-странице, указанной в названии таблицы, дана информация о существующих модельных прогонах и о том, какова процедура доступа к результатам расчетов.

Эти модели имеют разное временное и пространственное разрешение (типично — $5 \times 5^\circ$), также иногда используют разные геодезические проекции.

Когда целью работы является получение региональной оценки последствий изменения климата, исследователи обычно пользуются каким-либо определенным сценарием антропогенного воздействия на климат (чаще — из семейств SRES) и средним по множеству прогонов какой-либо МОЦАО расчетным климатом. В последнее время стало популярным не только осреднение по про-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

Таблица 3.1.1. Основные полномасштабные МОЦАО, созданные в мировых центрах по моделированию глобального климата (http://www.mad.zamw.de/IPCC_DDC/html/SRES_AR4/index.html)

Название центра, страна	Аббревиатура	Символ модели
Beijing Climate Center, Китай	BCC	CM1
Bjerknes Centre for Climate Research, Норвегия	BCCR	BCM2.0
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, Канада	CCCma	CGCM3 (T47 resolution)
		CGCM3 (T63 resolution)
Centre National de Recherches Meteorologiques, Франция	CNRM	CM3
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Австралия	CSIRO	Mk3.0
Max Planck-Institut for Meteorology, Германия	MPI-M	ECHAM5-OM
Meteorological Institute, University of Bonn, Германия	MIUB	ECHO-G
Meteorological Research Institute of KMA, Корея	METRI	
Model and Data Groupe at MPI-M, Германия	M&D	
National Centre for Atmospheric Research, США	NCAR	PCM
		CCSM3
UK Meteorological Office, Великобритания	UKMO	HadCM3
		HadGEM1
National Institute of Geophysics and Volcanology, Италия	INGV	SXG 2005
Institute of Atmospheric Physics, Китай	LASG	FGOALS-g1.0
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, США	GFDL	CM2.0
		CM2.1
Goddard Institute for Space Studies, США	GISS	AOM
		E-H
		E-R
Institute for Numerical Mathematics, Россия	INM	CM3.0
Institut Pierre Simon Laplace, Франция	IPSL	CM4
National Institute for Environmental Studies, Япония	MIROC	MIROC3.2 hires
		MIROC3.2 medres
Meteorological Research Institute, Япония	MRI	CGCM2.3.2

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

гонам, но и по совокупности МОЦАО, что дает “мультимодельный ансамблевый климат”.

Остановимся кратко на использовании сценарных климатов будущего в прикладных климатологических исследованиях. Пусть у нас есть несколько таких климатов, полученных с помощью разных климатических моделей (МОЦАО), исходя из разных сценариев антропогенного воздействия на глобальный климат. Для каждого такого климата можно вычислить прикладной климатический индекс (например, сумму эффективных температур, если мы именно ее изучаем). Если изначально для каждой пары сценариев — модель была определена вероятность ее реализации, то для разных вычисленных значений изучаемого прикладного климатологического индекса также можно найти вероятность реализации. Далее можно анализировать полученное вероятностное распределение в целом или же какие-то его характеристики — средние, дисперсию и т. д.

Чаще всего, однако, употребляется несколько более грубый подход. А именно, вычисляется “средний климат” путем осреднения исходных климатов с соответствующими весами, задаваемыми их вероятностями (чаще всего равными весами), а затем для полученного среднего климата оценивается значение изучаемого прикладного климатологического индекса. Такой подход равносильно изложенному выше в том случае, когда прикладной климатологический индекс линейно зависит от климатической переменной или же нелинейность незначительно выражена. В ином случае надо применять первый подход.

3.1.2. Состояние зданий и сооружений, отопительный период, транспорт

При получении оценок последствий изменения климата, в том числе для состояния технических объектов и характеристики отопительного периода, используются сценарии изменения климата XXI столетия. Они основаны на сценариях антропогенных эмиссий парниковых газов А2 и В2, изложенных в Специальном докладе МГЭИК о сценариях эмиссий (Special Report on Emission Scenarios, 2000), и на соответствующих расчетах, выполненных с использованием совокупности (McAvaney et al., 2001) моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Используются также и иные сценарии, представленные в научных публикациях.

При построении оценок изменения продолжительности отопительного периода и потребления топлива на цели обогрева и охлаждения зданий для антропогенных эмиссий парниковых газов был принят сценарий А2 (Special Report on Emission Scenarios, 2000), а для соответствующих

оценок изменения климата были использованы результаты расчетов по следующим МОЦАО: CGCM2 (McFarlane et al., 1992), HadCM3 (Pope et al., 2000), ECHAM4 (Roeckner et al., 1996).

Для оценок влияния изменений климата на технические сооружения, расположенные в районах многолетней мерзлоты, использовали климатический сценарий В1 и модель GFDL.

Прикладные климатические индексы, применяемые для оценки изменения состояния технических систем и характеристик отопительного периода при каком-либо заданном сценарии изменения климата, описаны в разделе 2.1.2.

При построении оценок последствий изменения климата широко применяются различные схемы районирования территории России к воздействию меняющегося климата по показателям чувствительности, уязвимости, подверженности риску и т. д. В качестве географической основы используется, в частности, деление страны на административные единицы — федеральные округа (Приоритетные действия..., 2005).

Существенный риск связан с влиянием потепления климата на технические системы, расположенные в зоне многолетней мерзлоты. Увеличение температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы и связанное с ним изменение термического режима почвогрунтов может негативно сказаться на прочности фундаментов зданий и сооружений. В табл. 3.1.2 количественно охарактеризована эта зависимость.

Для выявления областей, в которых построенные на многолетней мерзлоте здания и сооружения будут подвержены наибольшей опасности при изменении климата, а также для районирования криолитозоны России вообще был разработан метод, основанный на применении расчетного индекса (Анисимов, Белолуцкая, 2002; Анисимов, Лавров, 2004; Nelson et al., 2001, 2002):

$$I_r = k_s \Delta Z_n C_n.$$

Здесь I_r — индекс геокриологической опасности, k_s — коэффициент, учитывающий засоленность грунта, ΔZ_n — относительное изменение глубины сезонного протаивания многолетней мерзлоты, рассчитанное для заданного сценария изменения климата, выраженное в долях от современной нормы, а C_n — процентное содержание льда в мерзлом грунте. При такой оценке наибольшая вероятность развития деструктивных геокриологических процессов (значительное увеличение глубины сезонного протаивания) возникает в случае, когда мерзлый грунт содержит большое количество льда. В таких районах возможны просадки оттаивающего грунта вследствие интенсивного термокарста. Изменение температуры грунта, которое является главным фактором, влияющим на его

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

Таблица 3.1.2. Влияние изменения температуры воздуха на несущую способность мерзлого грунта (по данным Л. Н. Хрусталева, опубликованным в (Weller and Lange, 1999))

Изменение мерзлого грунта	Изменение среднегодовой температуры воздуха, °С			
	0,5	1,0	1,5	2,0
Изменение несущей способности фундаментов зданий, %	-5	-15	-25	-50
Изменение несущей способности опор трубопроводов и линий электропередачи, %	-10	-20	-30	-60

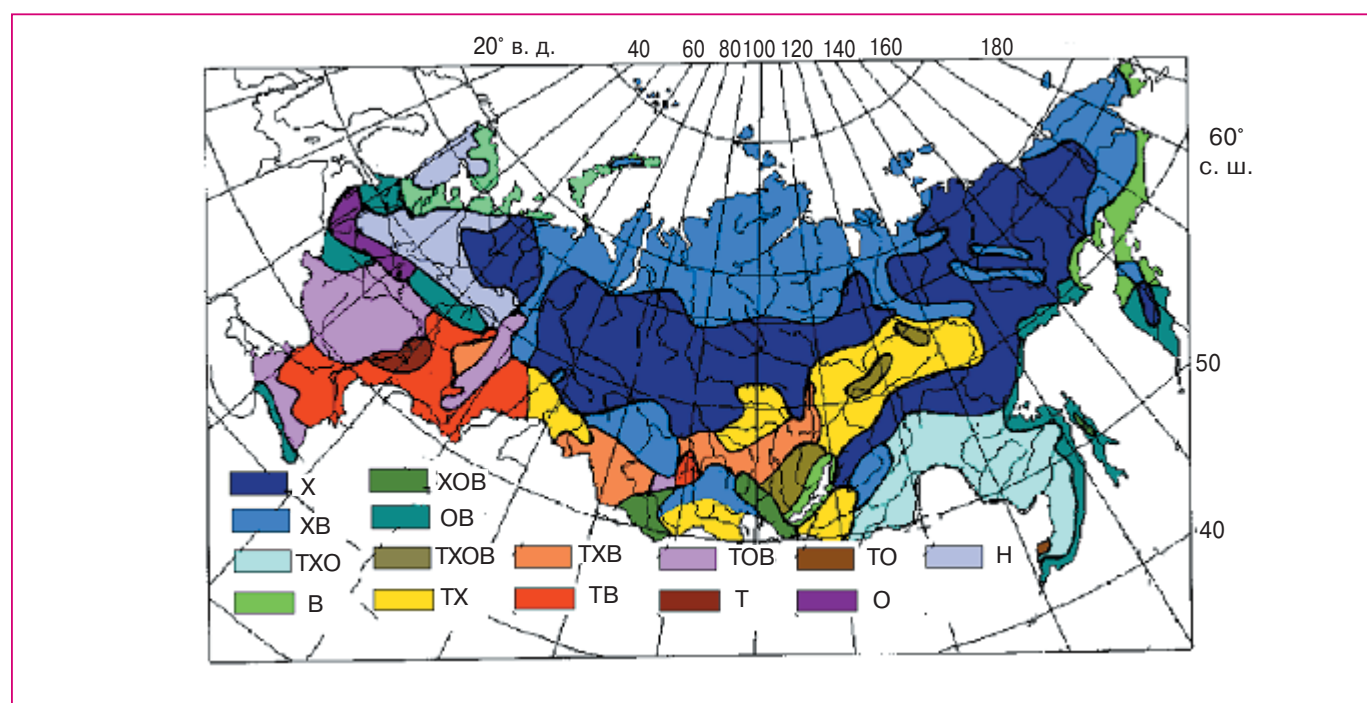


Рис. 3.1.4. Районирование территории России по наличию экстремальных гидрометеорологических явлений и их сочетаний: Т — тепло, X — холодно, О — осадки, В — ветер, Н — отсутствие опасных для транспорта гидрометеорологических явлений (Кренке, Чернавская, 2003).

несущую способность, неявно учитывается в этом индексе через изменение глубины протаивания.

При выполнении перспективных оценок с помощью этого индекса для середины XXI века (см. раздел 3.2) использовали сценарий В1 и климатическую модель GFDL.

При построении перспективных оценок последствий изменения климата и оценок их ответственности (опасности) важную роль играют схемы районирования территории по наличию экстремальных гидрометеорологических явлений, поскольку районы, где в большей степени выражены такие условия, или районы, находящиеся в таких условиях сразу по нескольким параметрам, могут оказаться более уязвимыми при меняющем-

ся климате. На рис. 3.1.4 приведено районирование территории России по наличию экстремальных температур, осадков и ветра; на карте показаны также области, где опасные для транспорта гидрометеорологические явления отсутствуют.

3.1.3. Сельское хозяйство

3.1.3.1. Растения

Последствия изменения климата для сельского хозяйства России в XXI веке оценивались для четырех вариантов климата будущего, соответствующих четырем сценариям мирового социально-экономического развития. Это сценарии А1, А2,

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

V1 и V2, которые приводят к разным траекториям эмиссий парниковых газов в атмосферу и к разным климатам, для расчета которых применялась климатическая модель HADCM3 (см. раздел 3.1.1). Для территории России использовались также региональная модель климата (Школьник и др., 2006) и ансамблевый сценарий изменения климата (Мелешко и др., 2004). Применялись также палеоклиматические реконструкции и сценарии, рассчитанные с помощью климатических моделей при условии удвоения концентрации диоксида углерода конца XX века к концу XXI века.

При ретроспективных расчетах климата XX века с использованием фактических изменений концентраций парниковых газов некоторые глобальные климатические модели успешно воспроизвели вековые тренды температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы. Для больших пространственных масштабов (глобального, континентального) современные МОЦАО позволяют удовлетворительно воспроизводить наблюдаемые средние годовые значения и сезонный ход большого числа гидрометеорологических величин. Однако оценки облачности и осадков имеют значительную неопределенность, как и поля высоты снежного покрова, содержания почвенной влаги и температуры почвы. Ни одна из известных глобальных климатических моделей к настоящему времени не признана лучшей.

В этих условиях наиболее разумным подходом к оценке влияния ожидаемых изменений климата на сельское хозяйство представляется использование имитационных моделей “Погода — урожай”, для которых входной информацией служит ансамбль результатов расчета климата будущего, полученных с помощью признанных МОЦАО.

Последствия возможного изменения климата в XXI веке для сельского хозяйства России анализировались в данном докладе с помощью следующих методов:

— имитационное математическое моделирование; соответствующий программный комплекс “Климат — почва — урожай” описан в работах (Сиротенко, Павлова, 2003; Сиротенко и др., 2005; Александров, 2006);

— классические биоклиматические и агроклиматические показатели (Шашко, 1985);

— регрессионный анализ временных рядов данных о климате и урожае (см., например, (Lobell and Field, 2007));

— метод пространственно-временных аналогов (Сиротенко, Павлова, 2003);

— модели динамики содержания органического углерода в почве при разных вариантах изменений климата в будущем (Романенков и др., 2003; Сиротенко и др., 2005).

3.1.3.2. Насекомые — вредители сельскохозяйственных растений

Саранчовые. Гидротермический фактор является одним из главных в динамике численности и миграциях саранчовых — опасных вредителей сельскохозяйственных растений. Климат в значительной степени определяет ареалы видов, а погодные условия конкретного года — уровень численности популяции и миграционную активность. Соответствующие количественные закономерности исследовались отечественными специалистами — см., например, (Рубцов, 1935; Винокуров, 1949; Цыпленков, 1970; Сафарова, 1987).

В качестве характеристики степени пригодности климата данного географического района для обитания нестатных саранчовых И. А. Рубцовым (1935) был предложен специальный индекс аридности

$$A = \frac{R}{\Sigma T_+ - 36}.$$

Здесь R — годовая сумма осадков (мм), а ΣT_+ есть сумма положительных среднемесячных значений температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за теплое время года (апрель — сентябрь). С помощью этого индекса можно также прогнозировать численность ряда форм саранчовых.

Колорадский жук. Зависимость развития колорадского жука *Leptinotarsa decemlineata* Say от гидротермического фактора достаточно детально изучалась отечественными и зарубежными специалистами. Среди множества предложенных количественных критериев упомянем следующие два.

1) Сумма эффективных температур ($^{\circ}\text{C}$ в сутки), вычисляемая как сумма превышений средне-суточной температурой определенного порогового значения, выше которого возможно развитие особи. Этот критерий уже встречался в разделах 2.1.3 и 2.1.5.

На основании анализа суммы эффективных температур М. Д. Злотников (1967) выделил на европейской части СССР четыре климатические зоны развития колорадского жука. В своей работе он использовал результаты исследований А. Альфаро (Alfaro, 1943, 1949) и К. И. Ларченко (1958). Согласно К. И. Ларченко (1958), для развития одного поколения (от яйца до имаго — взрослой особи) необходима сумма эффективных температур, равная $360^{\circ}\text{C} \times \text{сутки}$, при пороговом значении температуры $11,5^{\circ}\text{C}$ (Alfaro, 1943, 1949). Эта сумма складывается из количества тепла, необходимого для созревания яиц у жуков, вышедших из почвы после зимовки ($30^{\circ}\text{C} \times \text{сутки}$), для развития эмбрионов ($50^{\circ}\text{C} \times \text{сутки}$), для развития личинок I–II возрастов ($70^{\circ}\text{C} \times \text{сутки}$), для личинок III возраста ($40^{\circ}\text{C} \times \text{сутки}$), личинок IV возраста ($70^{\circ}\text{C} \times \text{сутки}$)

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

и для развития предкуколок и куколок до выхода молодых жуков из почвы ($100^{\circ}\text{C} \times \text{сутки}$). Для развития двух генераций необходимо $720^{\circ}\text{C} \times \text{сутки}$, а трех — $1080^{\circ}\text{C} \times \text{сутки}$ при пороговом значении температуры $11,5^{\circ}\text{C}$. Потенциальный ареал колорадского жука — совокупность тех географических точек, климат которых допускает развитие хотя бы одной генерации.

2) Ареал колорадского жука на территории бывшего СССР описывается двумя изотермами: изотермой среднегодовой температуры 0°C , ограничивающей ареал колорадского жука на севере и востоке, и изотермой среднемесячной температуры июля 27°C , ограничивающей его с юга. Данные изотермы удовлетворительно очерчивают ареал колорадского жука в Северной Америке, где его можно считать установившимся. Такой подход к описанию потенциального ареала колорадского жука и его изменений в связи с изменением климата был реализован в работе (Ясюкевич и др., 2007).

3.1.4. Водные ресурсы

Расчеты с помощью большинства МОЦАО указывают на то, что в XXI веке повышение температуры воздуха в высоких широтах может быть более значительным, чем в глобальном масштабе (в 2–3 раза). Перспективные оценки суммы осадков в силу их большей пространственной и временной изменчивости обладают большей степенью неопределенности. Перспективные оценки суммы осадков, полученные с помощью разных моделей, для некоторых районов существенно различаются не только по величине, но и по знаку. Однако практически все модели предсказывают значительные изменения в гидрологическом цикле при развитии процесса глобального потепления (Allen and Ingram, 2002; Palmer and Rätsänen, 2002; Milly et al., 2002), в частности увеличение осадков в высоких и умеренных широтах. Результаты расчетов по некоторым моделям указывают на значительное увеличение повторяемости экстремальных осадков и увеличение риска наводнений (Milly et al., 2002).

В последние годы наиболее часто для оценки изменений в гидрологическом цикле в XXI веке для разных речных бассейнов и территорий использовались следующие климатические модели и сценарии: модели HadCM2, GFDL-R15, ECHAM4 и CGCM1 для расчетов по сценарию IS92 (увеличение концентрации CO_2 в атмосфере на 1% в год в течение XXI века), а также модели HadCM3 и CGCM2 для расчетов по сценариям SRES (см. раздел 3.1.1).

В качестве альтернативного сценария климатических условий будущего использовались палеоклиматические реконструкции температуры возду-

ха и годовых сумм осадков для глобального потепления на $1,5^{\circ}\text{C}$ (Лемешко, 2002).

С точки зрения сходства результатов расчетов основных климатических показателей с современными фактическими значениями применительно к территории России наилучшие результаты (наряду с моделью ECHAM4) дает модель HadCM3 (Менжулин и др., 2005). В этой связи перспективные оценки стока российских рек на 2010–2039 гг. были получены на основе климата будущего, рассчитанного по этой модели (Шикломанов, Георгиевский, 1995, 2002, 2003, 2004). Выбор конкретного сценария антропогенного воздействия на глобальный климат в данном случае не имеет существенного значения, поскольку до 2040 г. все известные сценарии приводят примерно к одинаковым изменениям климата. Расчеты гидрологических параметров, соответствующих климату будущего, выполнены с использованием воднобалансовой модели ГГИ (Георгиевский и др., 1996).

3.1.5. Здоровье населения

3.1.5.1. Общие замечания

Ожидаемое в XXI веке потепление климата потенциально может приводить к изменениям условий труда и проживания людей, а также к изменению рисков для здоровья населения, связанных с трансмиссивными инфекциями (Climate Change 2001, 2001). Для получения перспективных оценок этих последствий, вообще говоря, необходимы данные о климате XXI века с суточным разрешением, поскольку соответствующие зависимости воздействие — отклик обычно нелинейны. Такие данные стали доступны лишь недавно (результаты расчетов с помощью МОЦАО с использованием SRES-сценариев антропогенного воздействия на климат), и их использование в региональных оценках только начинается.

Поэтому до настоящего времени для оценки последствий изменения климата в XXI веке для здоровья населения исследователи привлекали иные, упрощенные допущения и сценарные предположения о возможных долговременных изменениях климатических параметров, в рамках которых получали перспективные оценки их последствий. Такие сценарные предположения в основном делаются в отношении частоты и продолжительности периодов времени с экстремальными значениями гидрометеорологических величин, а также в отношении климатических характеристик их годового хода (Ревич, Шапошников, 2006; Семенов и др., 2006).

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

3.1.5.2. Экстремально высокая температура (волны тепла)

Условия существования людей зависят в большой степени от экстремальности гидрометеорологических условий. Так, увеличение длительности периодов с экстремально высокой и экстремально низкой температурой, ее значения в эти периоды, частота экстремальных явлений погоды сказываются как непосредственно на состоянии здоровья людей, так и опосредствованно, через изменение качества питьевой воды, продуктов питания и состояния загрязнения атмосферы вредными примесями.

Оценка рисков, связанных с волнами тепла заданных продолжительности и выраженности, выполняется методами, описанными в разделе 2.1.5, а перспективные оценки последствий изменения климата — методами экстраполяции с привлечением сценариев изменения демографической ситуации и экономического развития.

3.1.5.3. Инфекционные болезни

Процессы, связанные с потеплением климата, могут привести к расширению зоны, благоприятной для распространения трансмиссивных заболеваний и их переносчиков. Это возможно как вследствие повышения температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы, так и вследствие изменения количества осадков, господствующих ветров, высоты снежного покрова. Это может привести к увеличению риска для здоровья населения — может увеличиться число людей, проживающих в зонах с большим риском заражения инфекционными заболеваниями (Climate Change 2001, 2001), в том числе малярией (Lieshout et al., 2004).

Потепление климата может привести в XXI веке к расширению ареалов переносчиков малярии, возникновению условий ее передачи на высотах более 1500 м над уровнем моря, увеличению длительности сезона передачи и числа “оборотов инфекции”, возобновлению местной передачи тропической малярии. В отношении малярийных комаров комплекса *An. maculipennis* известно, что в южных регионах Западной Сибири, а также в Томской и Тюменской областях вследствие потепления климата уже происходит замещение одних из наиболее холодолюбивых видов комплекса — *An. beklemishevi* и *An. messeae* с северным кариотипом — на *An. messeae* с южным кариотипом. На ЕТР возможно расширение ареалов *An. atroparvus* и *An. maculipennis*, которые являются более эффективными переносчиками малярии, чем *An. beklemishevi* и *An. messeae* (Сергиев и др., 2004).

В настоящее время не существует научных публикаций, в которых для территории России

оценивается изменение риска в XXI веке, связанного с малярией человека, при изменении климата в соответствии со SRES-сценариями. В связи с этим в данном докладе анализируются два упрощенных сценария для территории России (Семенов и др., 2006):

а) средняя температура в XXI веке на протяжении 30 лет или более увеличивается на 1 и 2°C по сравнению со значениям 1966–1995 гг., а характер естественной изменчивости на более коротких периодах времени не меняется;

б) тенденция изменения климата 1996–2025 гг. по сравнению с 1966–1995 гг. будет такой же, как в 1966–1995 гг. по сравнению с 1936–1965 гг.

В рамках этих сценариев оценен будущий потенциальный ареал трехдневной малярии в XXI веке. При этом использовались данные о суточных значениях температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы с сети метеорологических станций Росгидромета и прикладные климатические индексы, описанные в разделе 2.1.5.

3.1.6. Природные экосистемы суши

3.1.6.1. Общие замечания

Для построения перспективных оценок воздействия изменения климата в XXI веке на природные экосистемы суши часто необходима информация о значениях метеорологических величин с высоким временным разрешением — месячным, суточным и более. Их изменчивость именно в таких временных масштабах управляет некоторыми важными процессами в живой природе (например, фотосинтезом растений, наступлением фенологических событий). Долгосрочный прогноз значений метеорологических величин с таким разрешением невозможен. Поэтому в таких случаях в качестве входной информации можно использовать лишь перспективные их оценки в климатическом осреднении за какие-либо периоды времени в будущем, а также свойства вероятностного распределения их значений.

При моделировании реакции природных экосистем на изменение климата используются модели равновесия (steady-state model), описывающие то новое состояние равновесия, в котором будет находиться моделируемая природная экосистема при заданном измененном климате, модели переходных процессов от исходного равновесного состояния к новому, а также модели нестационарных процессов, описывающие изменения природных экосистем в постоянно меняющемся климате. Последнее направление моделирования еще не вполне сложилось, и такие модели пока используются ограниченно.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

3.1.6.2. Фенологические сроки растений

Для получения перспективных оценок изменения сроков наступления фенологических событий в жизни растений, вызванного изменением климата, используются простые модели — прикладные климатические индексы, описывающие связь годового хода метеорологических величин с фенологическими событиями. В разделе 2.1.6 описан метод расчета фенологических дат растений с помощью суммы эффективных температур (интеграл превышений среднесуточного значения температуры воздуха порогового значения T_n). Фенологическое событие наступает в те сутки, когда этот интеграл от начала года до этих суток превысит определенную константу S_0 . Модельные константы специфичны для биологического вида и типа события.

Правильность этого подхода, предложенного еще в середине XX века (см., например, (Шигалев, Шиманюк, 1949)), впоследствии многократно подтверждалась современными исследованиями. Так, в работе (Lappalainen, 1994) для территории Финляндии исследована связь суммы эффективных температур с фенологическими датами — распусканием листьев и цветением — шести групп деревьев, кустарников и кустарничков: береза *Betula* spp. (*Betula pendula* Roth., *Betula pubescens* Ehrh.), осина *Populus tremula* L., черемуха обыкновенная *Prunus padus* L., брусника *Vaccinium vitis-idaea* L., смородина красная *Ribes rubrum* (*Ribes rubrum* L., *Ribes spicatum* Robson.) и рябина обыкновенная *Sorbus aucuparia* L. Было обнаружено, что расчетные фенологические даты достаточно точно соответствуют фактическим. В табл. 3.1.3 приводятся оценки модельной константы S_0 для

$T_n = 5^\circ\text{C}$ для упомянутых выше видов растений. Напомним, что размерность S_0 есть $^\circ\text{C} \times \text{сутки}$, но при ее вычислении с использованием среднесуточных значений температуры (т. е. когда интеграл заменяется суммой) в отечественной литературе по традиции S_0 дается просто в $^\circ\text{C}$.

На территории России для расчетной оценки начала зеленения березы бородавчатой *Betula pendula* Roth. используются значения $S_0 = 55^\circ\text{C}$ при $T_n = 5^\circ\text{C}$ (Шигалев, Шиманюк, 1949).

Тесная связь метеорологических процессов и времени наступления фенологических событий у растений породила даже некоторые предложения использовать последние для мониторинга климата (Beaubien and Johnson, 1994).

3.1.6.3. Прирост деревьев

Обычные статистические модели, связывающие радиальный прирост деревьев с гидрометеорологическими величинами, могут быть недостаточно надежны при построении долгосрочных перспективных оценок прироста. Калиброванные по данным какого-либо базового периода, они могут давать значительные расхождения с экспериментальными данными на другом продолжительном периоде времени. Так, статистическая регрессионная модель, связывающая прирост со среднемесячной температурой и месячными суммами осадков, была калибрована на данных 1935–1965 гг. Для калибровки были использованы ряды радиального прироста деревьев по 285 древесно-кольцевым хронологиям с участков на территории России. Во многих случаях значения коэффици-

Таблица 3.1.3. Оценки модельной константы S_0 ($^\circ\text{C}$) при $T_n = 5^\circ\text{C}$ для шести групп растений по регионам Финляндии (Lappalainen, 1994)

Группа	Регион					
	южное побережье	западное побережье	юго-западная внутренняя часть	центральная внутренняя часть	восточная внутренняя часть	Лапландия
Bet*	50	45	61	–	76	64
Pop*	127	112	140	163	145	108
Bet	56	47	65	–	83	89
Pru	118	98	126	135	125	136
Sor	211	186	237	236	210	227
Vac	212	189	241	251	250	222
Rib	87	72	108	120	120	106

Примечание. Звездочка — распускание листьев; в остальных случаях — цветение; Bet — *Betula* spp.; Pop — *Populus tremula*; Pru — *Prunus padus*; Vac — *Vaccinium vitis-idaea*; Rib — *Ribes rubrum*; Sor — *Sorbus aucuparia*.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

ента корреляции оказались высокими (0,6–0,9). Однако рассчитанные с помощью этой модели ряды прироста деревьев для 1965–1998 гг. оказались весьма слабо коррелированными с фактическими рядами радиального прироста (Шишов и др., 2007). Следовательно, не все древесно-кольцевые хронологии могут быть использованы безоговорочно для реконструкции климата в прошлом. С другой стороны, структура регрессионных моделей отражает особенности климата. Изменение регрессионной модели свидетельствует об изменении климата, хотя и не раскрывает характер этого изменения.

Поэтому для перспективных оценок влияния изменения климата на прирост деревьев целесообразно применять имитационные модели прироста деревьев. Например, имитационная VS-модель (Ваганов, Шашкин, 2000) хорошо описывает не только радиальный прирост, но и структуру годичных колец у древесных растений (размеры клеток, соотношение ранней и поздней древесины и плотность древесины) в разных климатических условиях. Эти условия включают: резко континентальные высокоширотные, среднеширотные, условия муссонного климата, степные и полупустынные (Ваганов, Шашкин, 2000; Evans et al., 2006; Vaganov et al., 2006).

Для перспективных оценок влияния изменчивости климата на радиальный прирост деревьев можно использовать также гидротермический индекс — отношение суммы осадков в июне — сентябре к средней температуре тех же месяцев в год формирования кольца и в предыдущий (Соломина и др., 2007).

Используются и более сложные модели, описывающие биохимические и физиологические процессы в растении. Так, в работе (Цельникер и др., 2007) предложена модельная зависимость интенсивности фотосинтеза лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) от пяти внешних факторов изменения климата (интенсивности ФАР, температуры воздуха и почвы, дефицита влажности воздуха и запаса доступной влаги в почве). Были использованы биохимическая модель ассимиляции Фаркухара и эмпирическая модель устьичной проводимости.

3.1.6.4. Экотон

Для перспективной оценки изменений в состоянии ландшафтных компонентов на территории России, вызванных изменением климата, для трех временных срезов в XXI столетии (2030-е, 2050-е и 2080-е годы) использовался метод палеоаналогов. В качестве палеоаналогов были использованы оптимум голоцена (5,5 тыс. лет до современного периода), когда среднеглобальная темпе-

ратура была на 0,7–1°C выше современной, и оптимум микулинского (эемского) межледниковья (~125 тыс. лет до современного периода, среднеглобальная температура на 1,7–1,8°C выше современной). Эти уровни повышения среднеглобальной температуры весьма близки к ожидаемым в 30-х и 50-х годах XXI в. (Величко и др., 2002).

При выполнении перспективной оценки состояния растительного покрова в более отдаленном периоде будущего — на конец XXI века — можно исходить из следующих соображений: 1) данные МОЦАО по перспективным оценкам гидротермического режима при удвоении CO₂ для рассматриваемой территории мало отличаются от режима, установленного по палеоаналогам для оптимума микулинского межледниковья; 2) тенденции в развитии растительного покрова к концу XXI века можно выявить на основе реконструкции растительного покрова оптимума микулинского межледниковья, используя принцип характерных времен достижения тем или иным ландшафтным компонентом равновесия с климатическими условиями.

При оценке ответных реакций экосистем на изменение климата, в том числе для оценки вызванных изменением климата сдвигов границ растительных зон, широко применяются имитационные математические модели. Например, усовершенствованная модель Будыко (Budyko, 1974, 1986), связывающая характеристики растительности с радиационным балансом и индексом засушливости, была использована для расчета изменения границ растительных зон в ответ на изменение климата (Tchebakova et al., 1993; Monserud et al., 1993a, 1993b). Это — модель равновесия, которая описывает не ожидаемый сдвиг границ в определенный период в будущем, а их положение, соответствующее климату этого периода по достижении состояния равновесия растительности в новых климатических условиях.

3.1.6.5. Климатическое опустынивание

Последствия возможного глобального потепления в XXI веке в аспекте климатического опустынивания рассмотрены на примере Европейской территории России для того субрегиона, где доминирует антропогенная составляющая опустынивания (см. раздел 2.6). Изменения климатических факторов опустынивания — показателей аридности и опасных засух — в заданные десятилетия XXI века определены по данным архива численных экспериментов на региональной климатической модели ГГО (РКМ ГГО) (Школьник и др., 2000, 2005, 2006). Модельные расчеты регионального климата ЕТР проводились для трех десятилетий: 1991–2000 гг. (базовый климат), 2041–2050 и 2091–2100 гг. (Школьник и др., 2005). Содержание в атмосфере парниковых газов и аэрозолей в первое

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

десятилетие расчета задавалось в соответствии с данными наблюдений, а для остальных — в соответствии со сценарием В2 МГЭИК (см. раздел 3.1.1). Полученный архив детальных модельных полей включает несколько десятков переменных с суточным разрешением.

Методика вычисления показателей аридности, опасных атмосферной и почвенной засух (см. раздел 2.1.6) по данным архива была следующая. Ряды среднесуточной температуры, суточных сумм осадков и суточных влагозапасов в 20-сантиметровом слое почвы за 1991–2000, 2041–2050 и 2091–2100 гг. выбирались из архива только для узлов сетки, вблизи которых находились метеостанции. Далее для этих узлов вычислялись показатели и строились соответствующие карты в системе MapInfo. Изменения показателей в 2041–2050 гг. и 2091–2100 гг. по сравнению с 1991–2000 гг. считались значимыми, если они превышали среднеквадратическое отклонение.

Качество воспроизведения РКМ ГГО показателей аридности и опасной атмосферной засухи оценивалось за период 1991–2000 гг. Показатель опасной почвенной засухи был исключен из сравнения из-за недоступности обобщенных данных наблюдений. Относительная ошибка воспроизведения вычислялась по формуле

$$\Delta X = (X_m - X_0)/X_0,$$

где X_m и X_0 — соответственно модельное и наблюдаемое значения показателей.

Распределение ошибки воспроизведения РКМ ГГО показателя аридности неоднородно в степных и полупустынных районах ЕТР. В этих районах модель завышает показатель аридности, а ошибка колеблется в пределах 10–35%. В лесостеп-

ных районах ΔX принимает отрицательные значения, но несколько уменьшается по абсолютной величине.

На большей части территории модель завышает частоту опасной атмосферной засухи, особенно на западе Калмыкии, юге Волгоградской и Астраханской областей, в среднем на 15% и занижает южнее 45° с. ш. в среднем на 20%.

Таким образом, модель в целом удовлетворительно воспроизводит частоту опасной атмосферной засухи. Несколько хуже воспроизводится моделью показатель аридности климата вегетационного сезона.

3.1.6.6. Особо охраняемые природные территории

Для перспективной оценки влияния изменения климата на флористическое разнообразие используются методы нелинейной пошаговой регрессии, множественной нелинейной регрессии, кластерный и дискриминантный анализы. Так, в работе (Кожаринов, Минин, 2001) построена нелинейная регрессионная модель для описания зависимости флористического разнообразия от климата. В табл. 3.1.4 приведены характеристики корреляционной связи таксономического разнообразия флоры с параметрами климата.

В работе Е. И. Парфеновой и Н. М. Чебаковой (2006) получена зависимость разнообразия сосудистых растений от термических показателей в 15 флористических районах Сибири по данным Л. И. Малышева и др. (2000). Были использованы максимальные и минимальные значения суммы положительной среднесуточной температуры воздуха за календарный год в долговременном ряду

Таблица 3.1.4. Значения коэффициентов корреляции τ Кендалла между ведущими климатическими параметрами и значениями таксономического разнообразия флоры

Параметр климата	<i>S</i>	<i>G</i>	<i>F</i>
T4 — средняя температура воздуха в апреле	0,621	0,648	0,576
T8 — средняя температура воздуха в августе	0,644	0,676	0,572
TSUM5 — сумма температур выше 5°C за год	0,646	0,677	0,572
TSUM10 — сумма температур выше 10°C за год	0,652	0,677	0,572
OS4 — количество осадков в апреле	0,420	0,435	0,481
OT3 — число дней с оттепелями в марте	0,546	0,590	0,538
IAD — число ясных дней в году	0,578	0,564	0,471
HH9 — дефицит влажности в сентябре	0,663	0,685	0,581
NDNSP — число дней в году с устойчивым снежным покровом	-0,585	-0,590	-0,533
UM — число дней с устойчивыми морозами	0,565	-0,587	-0,526

Примечание. *S*, *G*, *F* — число видов, родов и семейств на учетном участке единичной площади с данными климатическими параметрами; уровень достоверности $p < 0,001$.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

наблюдений — $(\Sigma T_0)_{\max}$ и $(\Sigma T_0)_{\min}$ соответственно. Первый показатель характеризует возможные максимальные ресурсы тепла в регионе, а показатель $\Delta = (\Sigma T_0)_{\max} - (\Sigma T_0)_{\min}$ — диапазон теплообеспеченности. Линейная зависимость, связывающая количество видов сосудистых растений N во флористическом регионе, которое колебалось от 488 до 2535 видов, определялась показателями $(\Sigma T_0)_{\max}$ и Δ ($R^2 = 0,82$):

$$N = 0,58 (\Sigma T_0)_{\max} + 0,52\Delta - 420.$$

Эта зависимость позволяет выполнять перспективные оценки изменения разнообразия сосудистых растений при изменении климата, исходя из перспективных оценок изменения климатического годового хода среднесуточной температуры воздуха. Последние уже в значительной степени являются доступными для всего XXI века по результатам расчетов с помощью современных МОЦАО, типичное пространственное разрешение которых $5 \times 5^\circ$.

3.1.7. Континентальная многолетняя мерзлота и ледниковые системы

3.1.7.1. Состояние криолитозоны

Перспективные оценки состояния криолитозоны — континентальной многолетней мерзлоты — выполняются на основе:

— собственно данных измерений температуры почвогрунтов на глубинах до 3,2 м на метеорологических станциях и многолетнемерзлых грунтов до глубин порядка 100 м на геокриологических стационарах, а также результатов

регрессионного анализа, при котором изучается зависимость температуры почвогрунтов от более доступных для измерения предикторов — температуры воздуха, осадков, высоты снежного покрова и т. д. (data-based models);

— представлений о возможных изменениях этих предикторов в будущем, которые оцениваются при расчетах ожидаемого климата с помощью математических моделей глобального и регионального климатов.

В табл. 3.1.5 для примера приведена корреляционная матрица (ранговые коэффициенты корреляции Спирмена сглаженных значений) температуры воздуха, количества осадков и высоты снежного покрова, а также температуры почвогрунта на глубинах 80 и 160 см. Здесь T_G, T_Z, T_L — средние за год, за холодный и теплый периоды года соответственно значения температуры воздуха в приповерхностном слое атмосферы; R_G, R_Z, R_L — средние за год, за холодный и теплый периоды года значения суммы осадков соответственно; H_{SN} — средняя за 7 зимних месяцев высота снежного покрова; $T80_G, T80_Z, T80_L, T160_G, T160_Z, T160_L$ — средние за год, за холодный и теплый периоды года соответственно значения температуры почвогрунта на глубине 80 и 160 см.

Парные коэффициенты корреляции используются для выбора в первом приближении предикторов, в наибольшей степени влияющих на температуру почвогрунта на глубинах 80 и 160 см. Наибольший эффект при этом дает учет высоты снежного покрова, несмотря на сравнительно невысокие значения корреляции с температурой почвы (Израэль и др., 2006).

Таблица 3.1.5. Ранговые коэффициенты корреляции Спирмена годовых и сезонных значений (для холодного и теплого периодов года) температуры воздуха, суммы осадков, высоты снежного покрова и температуры почвогрунта на глубинах 80 и 160 см для метеостанции Якутск (Израэль и др., 2006)

	T_G	T_Z	T_L	R_G	R_Z	R_L	H_{SN}
T_G	1	0,98	0,89	-0,57	-0,64	-0,32	-0,29
T_Z	0,98	1	0,82	-0,55	-0,56	-0,35	-0,37
T_L	0,89	0,82	1	-0,68	-0,70	-0,30	
R_G	-0,57	-0,55	-0,68	1	0,52	0,69	0,30
R_Z	-0,64	-0,56	-0,70	0,52	1	—	0,38
R_L	-0,32	-0,35	-0,30	0,69	—	1	—
H_{SN}	-0,29	-0,37	—	0,46	—	0,41	1
$T80_G$	0,76	0,72	0,79	-0,56	-0,65	-0,26	0,24
$T80_Z$	0,78	0,74	0,81	-0,58	-0,67	-0,26	0,21
$T80_L$	-0,78	-0,77	-0,66	0,46	0,61	0,24	—
$T160_G$	0,80	0,76	0,81	-0,65	-0,49	-0,33	0,22
$T160_Z$	0,81	0,76	0,84	-0,59	-0,53	-0,32	0,20
$T160_L$	-0,24	-0,30	—	-0,25	—	-0,22	—

Примечание. Пояснения приведены в тексте.

В качестве перспективных оценок предикторов обычно используются сценарии, рекомендованные Межправительственной группой экспертов по изменению климата и представленные к использованию Центром по распространению данных (IPCC Data Distribution Centre) на веб-странице <http://www.ipcc.data.org/>. В данном докладе использовались результаты расчетов по трем ОЦАО: CGCM2 (McFarlane et al., 1992), HadCM3 (Pope et al., 2000) и ECHAM4 (Roeckner et al., 1996) по сценарию A2 (Израэль и др., 2007). Существует около 40 равновероятных сценариев SRES развития общества и связанных с этим эмиссий парниковых газов, но до 2050 г. все сценарии дают весьма близкие оценки накопления парниковых газов.

Для оценки состояния континентальной многолетней мерзлоты и влияния на нее возможных в будущем изменений климата используются и полномасштабные математические модели процессов (process-based models). В прогностических расчетах используются как упомянутые выше сценарии изменения климата, предложенные МГЭИК, так и сценарии, получаемые независимыми методами.

В качестве входных климатических данных при модельных расчетах состояния многолетней мерзлоты обычно используются поля температуры воздуха и осадков месячного разрешения по времени, заданные в узлах регулярной сетки. В случае, если расчет проводится для условий будущего климата, к современным месячным нормам прибавляются их ожидаемые приращения, определяемые сценарием изменения климата. В расчетах с помощью моделей равновесия (steady-state models) оцениваются параметры квазистационарного состояния многолетней мерзлоты, соответствующего установившимся климатическим условиям. При изменении температуры воздуха за время порядка нескольких лет лишь верхний слой почвогрунта толщиной в несколько метров достигает состояния термического равновесия. Таким образом, результаты этих расчетов характеризуют лишь приповерхностный слой многолетней мерзлоты, изменения которого представляют наибольший практический интерес. Оценки изменения термического режима и состояния многолетней мерзлоты на больших глубинах можно получить при помощи более сложных полных динамических моделей, описывающих процесс распространения тепла в литосфере.

Глубина сезонного протаивания, являясь одним из наиболее важных параметров, обладает значительной пространственной изменчивостью даже на небольших расстояниях порядка нескольких метров и десятков метров. Это обусловлено локальными неоднородностями свойств почвы, растительности, в особенности мохово-лишайни-

кового покрова, и рядом других факторов, явно учесть которые не представляется возможным. Для воспроизведения такого рода пространственных неоднородностей в моделях используется стохастический подход, который предполагает, что влияющие параметры, характеризующие свойства почвы, снега и растительности, являются случайными функциями и варьируют в некоторых пределах вблизи их средних значений (Anisimov et al., 2002). Таким образом, для одних и тех же климатических условий проводится несколько вариантов расчета, каждый из которых соответствует одному из возможных сочетаний значений параметров снега, растительности и почвы. Получаемые статистические данные дают возможность построить вероятностную функцию распределения параметров многолетней мерзлоты, например, глубины сезонного протаивания.

Литературные источники, в которых обсуждаются математические модели влияния изменения климата на состояние континентальной многолетней мерзлоты, более полно представлены в разделе 2.1.7.

3.1.7.2. Ледниковые системы

Под соответствием оледенения климату понимается ситуация, когда баланс ледовой массы близок к нулю и при сохранении данного климата оледенение не будет меняться. При неизменном климате, если баланс положителен, то оледенение будет увеличиваться, при отрицательном — убывать. Сохранение тренда баланса ледников или изменение его знака происходит при изменениях климата. Оледенение может иногда поспевать за изменениями климата; в этом случае также сохраняются его нулевой баланс и равновесие с климатом. Динамика горного оледенения в условиях меняющегося климата является в последнее время одной из основных проблем климатологии и гляциологии (Dyurgerov, 2001; Ананичева, Кренке, 2005; Глазовский и др., 2005; Михаленко и др., 2005).

Методика построения перспективных оценок изменения морфологии и режима ледниковой системы, исходя из изменения средней для нее высоты границы питания ледников, определяемой по соотношению балансовых профилей, предложена М. Д. Ананичевой и А. Н. Кренке (2005; 2007 — в печати). Она применима для любых заданных сценариев изменения климата, в том числе из числа рекомендованных МГЭИК (строятся с помощью моделей общей циркуляции атмосферы). Суть методики состоит в следующем.

Для изучаемой ледниковой системы и заданного периода времени в прошлом или будущем строятся профили абляции и аккумуляции по дан-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

ным о температуре воздуха и осадках. Эти данные — фактические, если речь идет о прошлом, и сценарные (прогностические), если рассматривается какой-либо период времени в будущем. В каждом случае по пересечению этих вертикальных профилей можно установить высоту границы питания.

Далее для изучаемой ледниковой системы строятся гипсографические схемы распределения льда по высоте (необходимые для этого данные имеются в Каталоге ледников СССР (1969, 1972, 1981)). Принимается допущение о том, что граница питания всегда находится на средней высоте между высшими и низшими уровнями ледников в системе (тем самым какое-либо изменение высоты конца ледниковой системы приводит к вдвое меньшему изменению высоты границы питания). Считается также, что площадь, занятая льдом на высотах больше заданной, линейно или по иному известному закону увеличивается с уменьшением высоты от нуля в высших точках до 100% у концов ледников. Оледенение исчезает, если расчетная граница питания системы поднимается выше ее верхней точки.

Описанная выше методика была использована для получения перспективных оценок горного оледенения северо-востока страны в XXI веке.

Для оценок горного оледенения Большого Кавказа в XXI веке была использована достаточно тесная зависимость изменения площади современного оледенения от нескольких факторов: температуры воздуха, суммы атмосферных осадков, а также от предшествующих размеров оледенения (Панов, 1993). Чтобы оценить возможное изменение оледенения в будущем, необходимо знать не только размеры площади оледенения на конкретный начальный период расчета, но и значения климатических элементов на перспективу, т. е. в данном случае на XXI век. Последние данные были взяты из работ (Борзенкова и др., 1987; Жуков, Святкина, 2000): для разных сценариев в 2020–2050 гг. увеличение температуры воздуха в регионе за период абляции составит 1,0–5,5°C, а суммы атмосферных осадков за период аккумуляции — 5–45%.

3.1.8. Северные моря

3.1.8.1. Морской ледовый покров в Арктике

Вопрос о распространении морского льда в Арктике и о его изменении в условиях меняющегося климата (см., например, (Захаров, 2003; Lindsay and Zhang, 2005)) — один из важнейших при оценке состояния северных морей и возможностей хозяйственной морской деятельности в регионе в XXI веке.

Изменения климата Арктики в XXI веке оценивались ГГО на основе суперансамблевого расчета климата XX–XXI веков. При этом применялись МОЦАО нового поколения (Отчет ГГО, 2005), использованные при подготовке Четвертого оценочного доклада МГЭИК (Climate Change 2007, 2007). Был сформирован архив модельных данных для климатических характеристик северной полярной области. По сравнению с прежними архивами модельных данных новый архив отличается намного большим количеством как МОЦАО, так и климатических характеристик, а также большим разнообразием сценариев для XXI века.

Расчеты будущего климата Арктики с помощью ансамбля современных глобальных климатических моделей с учетом увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере показывают продолжение потепления и значительное повышение температуры воздуха в зимний период к середине XXI столетия (Отчет ГГО, 2005). Оценки на основе расчетов климата по ансамблю из 19 глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана показали, что увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере приведет к значительным изменениям климата северной полярной области уже в ближайшие десятилетия. К середине XXI столетия температура воздуха зимой над Арктическим бассейном может повыситься на 3–8°C, а площадь, занятая льдами в сентябре, сократится более чем на половину (Отчет ГГО, 2005).

Следует отметить, что полученные с использованием упомянутых выше моделей оценки отражают лишь тенденцию потепления, связанную с усилением парникового эффекта вследствие увеличения концентраций парниковых газов в атмосфере из-за антропогенных эмиссий. Однако они не отражают циклических естественных изменений климата в регионе. Такие циклические изменения, колебания происходили на протяжении XX века. Такого же рода колебания, и даже более значительные, отмечались и ранее — от эпохи викингов (X–XII века) до “малой ледниковой эпохи” XVII–XIX веков.

В настоящее время уже существуют специализированные модели, описывающие ледовитость арктических морей, для которых входной информацией служат перспективные оценки климата XXI века в регионе. Такая динамико-термодинамическая модель ледового покрова на трассе Северного морского пути была предложена в работе (Макштас и др., 1988). Эта модель использует поля среднемесячных значений приповерхностной температуры воздуха и атмосферного давления в Арктике в 2001–2015 гг., рассчитанные по пяти глобальным моделям климата с учетом увеличения

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

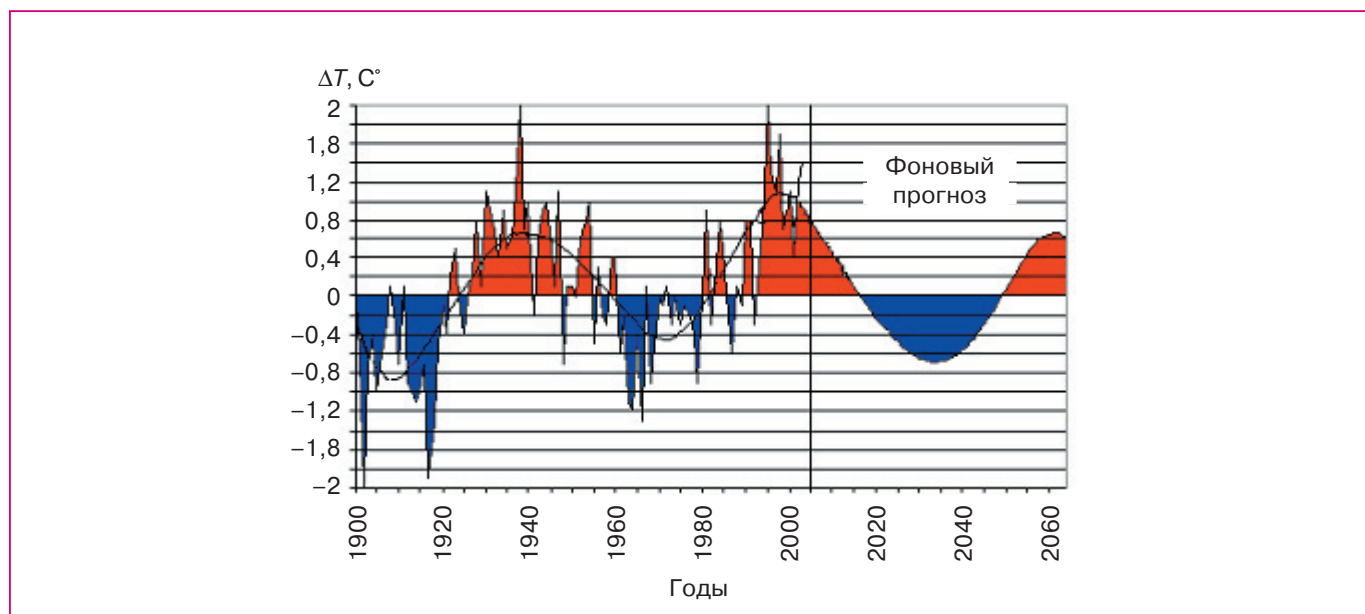


Рис. 3.1.5. Аномалии среднегодовой приповерхностной температуры воздуха в широтной зоне 70–85° с. ш. в XX — начале XXI века и экстраполяция выявленных циклических колебаний на ближайшие десятилетия.

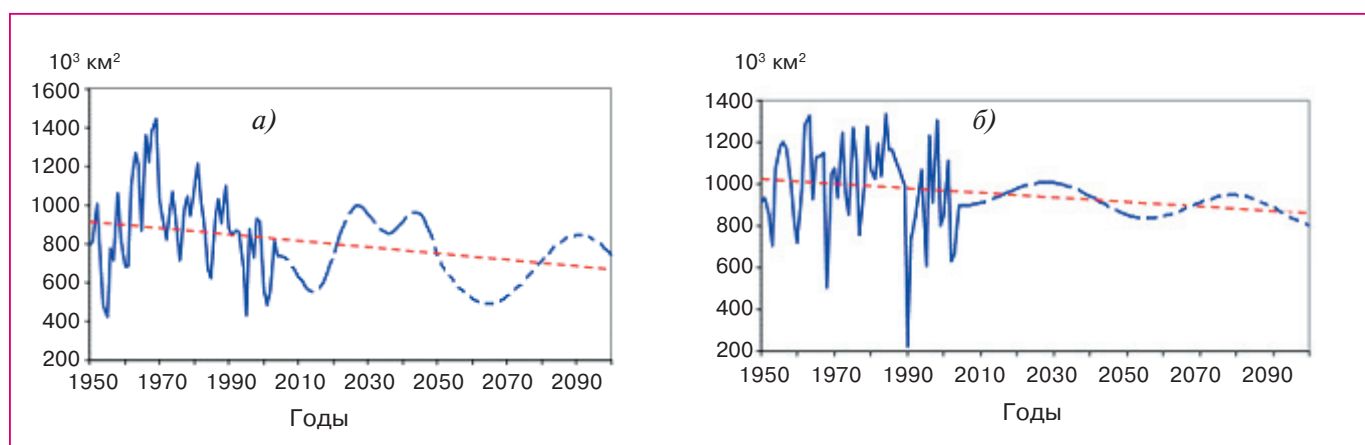


Рис. 3.1.6. Перспективная оценка изменений суммарной площади распространения льда в западных (а) и восточных (б) арктических морях в XXI веке с учетом линейного тренда второй половины XX века.

антропогенного влияния на глобальный климат. Результаты расчетов не показали существенного изменения ледовых условий на трассе Северного морского пути к 2015 г., а также кардинального уменьшения сплоченности и толщины льда в окраинных морях и Арктическом бассейне.

Выявленный в Арктике примерно 60-летней продолжительности цикл в долговременных изменениях температуры, площади льдов и других характеристик имеет естественное физическое обоснование (Гудкович и др., 2005). Это явление необходимо учитывать при построении оценок будущего климата Арктики как тот естественный

фон, на котором развиваются процессы глобального антропогенного потепления.

На рис. 3.1.5 видно, что последний период потепления в Арктике, начавшийся с середины 1980-х годов и продолжающийся в настоящее время, полностью не завершился. Его пик в арктической зоне пришелся на середину 1990-х годов, и с большой степенью вероятности теплый период завершится около 2015–2020 гг. В дальнейшем ожидается период похолодания, максимум которого придется на середину 2030-х годов, а окончание — на 2050-е годы. Наложение выявленных естественных циклических колебаний со значительной амплитудой на

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

ожидаемое антропогенное потепление в определенной мере смягчит потепление в 2020–2050 гг.

Прогноз возможных изменений ледовых условий в арктических морях с учетом естественных циклических колебаний ледовитости показывает, что до 2015 г. ледовые условия в арктических морях будут формироваться на пониженном фоне ледовитости с постепенной тенденцией ее повышения и ухудшения ледовых условий (рис. 3.1.6). Очередной максимум ледовитости арктических морей ожидается около 2030–2035 гг. (Карклин и др. 2001; Гудкович и др., 2005; Frolov et al., 2007a, 2007b).

3.1.8.2. Биологические системы северных морей

Изменения экологического состояния северных морей в XXI веке оценивались на основе качественной экстраполяции современных тенденций развития морских экосистем под влиянием потепления климата. Эти тенденции сводятся к следующему. Изменение климата приведет к смещению в полярном (северном) направлении южных и северных границ распределения рыб и других гидробионтов, утрате среды их обитания в холодных водах и к расширению среды обитания тепловодных рыб. Морские экосистемы уязвимы при изменении климата. К числу наиболее важных последствий потепления климата относятся уменьшение ледовитости морей, увеличение температуры и продолжительности вегетационного периода, уменьшение солености воды и утрата среды обитания ряда рыб и других промысловых гидробионтов, уменьшение биоразнообразия, усиление вымирания ряда обитающих видов и внедрение экзотических видов-вселенцев, потенциальное обострение существующих проблем конкуренции видов, возрастание эвтрофикации и загрязнения в импактных морских районах отдельных морских бассейнов, а также усиление влияния УФ-В радиации на биологические процессы в морях.

3.1.9. Южные моря

В литературе имеются перспективные оценки климатогенных изменений состояния южных морей для Азовского и Каспийского морей по отдельным показателям, причем прогнозу уровня Каспийского моря уделено основное внимание. Это связано с ограниченностью соответствующей информации, представленной в специальной научной литературе, — проекты этого направления находятся в значительной степени в стадии научно-исследовательских разработок.

При перспективной оценке изменений, которые ожидаются на акватории Азовского моря, используется сценарное предположение о повышении

уровня Мирового океана в XXI веке на 1 м по сравнению с современным уровнем вследствие термического расширения воды в верхних слоях Мирового океана, а также частичного таяния ледников Антарктиды и Гренландии. Эта оценка является заведомо мажорирующей, поскольку по результатам последних расчетов, опубликованных МГЭИК (Climate Change 2007, 2007), ожидаемое повышение уровня Мирового океана составит 0,18–0,59 м.

Для оценки усиления циклонической деятельности в будущем, увеличения увлажнения и, как следствие, распределения воды и подъема уровня в Каспийском и в Азовском морях вследствие потепления климата в настоящее время используются разные методы. Это — расчеты с помощью гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы и океана, статистические расчеты, а также расчеты, основанные на изменении составляющих водного баланса. Наиболее перспективным представляется применение гидродинамических моделей. Однако ввиду сложности их применения при региональных оценках непосредственно для южных морей конкретные результаты пока не достигнуты.

В связи с этим в работах (Мещерская, Голод, 2003) и (Абузяров, 2003) для получения перспективных оценок климатогенных изменений состояния южных морей, в частности их уровня, использовались статистические зависимости между показателями атмосферной циркуляции и изменениями уровня моря. Для Каспия в основу метода заложено предположение о том, что долговременные изменения уровня определяются атмосферными процессами. При этом время запаздывания изменения уровня от изменения атмосферных процессов может достигать нескольких лет. В связи с этим использовались асинхронные статистические связи. Изменения циркуляции рассматривались на всем пространстве Северного полушария, что позволило полнее охарактеризовать изменение влагозапаса на водосборном бассейне Каспийского моря.

Уровень Каспия определяется воздействием большого числа факторов, действующих одновременно. Относительный вклад этих факторов меняется в зависимости от изменений в климатической системе. Для выявления этих вкладов был применен метод пошаговой множественной линейной регрессии. Для построения корреляционных связей были использованы следующие временные ряды данных:

— временной ряд приращений среднегодовых значений уровня моря (по данным водного поста Махачкала с 1900 г. по настоящее время);

— ряды среднегодовых значений индексов циркуляции в форме Белинского для восьми районов Северного полушария;

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

— ряды среднегодовых значений коэффициентов разложения полей аномалий приземного атмосферного давления по естественным ортогональным функциям координат, рассчитанных для трех секторов Северного полушария.

3.1.10. Последствия экстремальных метеорологических явлений

3.1.10.1. Общие замечания

Методологической основой перспективных оценок последствий экстремальных метеорологических явлений и их опасности служат:

— перспективные региональные оценки индексов экстремальности метеорологических величин; они описывают события выхода значений этих величин за определенные границы; примерами могут служить выход значений приведенных в разделе 2.1.10 индексов Селянинова и Нестерова за некоторые границы, а также выход наблюдаемого значения стока за определенное пороговое значение;

— специализированное (для каждого типа экстремального гидрометеорологического явления) районирование территории по степени опасности заданных значений индекса экстремальности.

Необходимо иметь в виду, что долгосрочный прогноз или перспективная оценка значений гидрометеорологических величин и соответствующих индексов экстремальности с большим временным разрешением (на какие-то конкретные сутки, месяц или же год через несколько лет) теоретически невозможны. Возможны лишь перспективные оценки свойств их вероятностных распределений для больших промежутков времени — десятки лет, т. е. оценки в климатическом приближении.

Собственно ряды значений метеорологических величин и индексов экстремальности, соответствующие разным сценариям антропогенного воздействия на глобальный климат путем эмиссии парниковых газов в атмосферу, рассчитываются с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана в крупных мировых климатологических центрах. Часть этих рядов непосредственно относится к индексам экстремально-

сти, а основная часть описывает базовые метеорологические величины (температуру, сумму осадков и т. д.), по которым индексы экстремальности могут быть вычислены при необходимости.

Что касается районирования, то оно должно быть специализированным для экстремальных метеорологических явлений различных типов.

3.1.10.2. Засухи

Значительная часть пахотных земель расположена в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения, где засухи различной интенсивности и продолжительности наблюдаются почти ежегодно.

Градации засух для ЕТР по их интенсивности в зависимости от метеорологических условий приведены в табл. 3.1.6. В таблице условия возникновения засух охарактеризованы следующими показателями периода вегетации: превышение средней температурой воздуха (ΔT , °C) средней многолетней нормы, отношение количества выпавших осадков (ΔR , %) к средней многолетней норме, число засушливых декад ($N_{\text{зас}}$).

Тенденции изменения повторяемости засух в XXI веке на территории России определены на основе прогностических оценок изменения климата, полученных с помощью региональной климатической модели ГГО (Школьник и др., 2006). Посредством анализа соотношения сезонных значений температуры воздуха и количества осадков отдельных водосборных площадей определены регионы с ожидаемым (возможным) ростом засушливости климата (т. е. существенного роста температуры воздуха и заметного снижения количества осадков) и с учетом увеличения количества суток с экстремально высокими значениями температуры воздуха.

3.1.10.3. Лесные пожары

Для построения перспективных оценок пожарной опасности леса использовался индекс горимости Нестерова (Шерстюков, 2003), см. раздел 2.1.10.

Его значения для разных лет и периодов календарного года в будущем вычислялись на осно-

Таблица 3.1.6. Метеорологические условия возникновения засух на ЕТР (Грингоф, Пасечнюк, 2005)

Вид засухи	Метеорологические условия		$N_{\text{зас}}$, число декад
	ΔT , °C	ΔR , %	
Очень сильная	1,8–3,8	40–50	4,5–5,3
Сильная	2,2–2,3	62–70	3,5–4,2
Средняя	1,1–2,2	69–93	2,8–3,2

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

ве сценарных оценок изменения климата в XXI веке на территории России, которые составляют часть массива информации, полученной для всего мира по регулярной пространственной сетке с помощью МОЦАО. В данном случае использовались результаты расчетов по трем атмосферно-океаническим моделям климата: CGCM2 (McFarlane et al., 1992), HadCM3 (Pope et al., 2000) и ECHAM4 (Roeckner et al., 1996) по сценарию A2. Существует около 40 равновероятных сценариев SRES развития общества и связанных с этим эмиссий парниковых газов, но до 2050 г. все сценарии дают весьма близкие оценки накопления парниковых газов в атмосфере. Перспективные оценки, полученные по каждой отдельной климатической модели, содержат независимые между собой ошибки. Осреднение данных, полученных с помощью трех упомянутых моделей, позволяет несколько уменьшить эти ошибки. Поэтому для прикладных оценок использовались средние значения климатических характеристик, полученных по трем упомянутым моделям. Для вычисления индекса горимости были использованы среднемоделные оценки климата с месячным разрешением по времени.

Для пункта расположения каждой из 1400 метеостанций Росгидромета вычислялся будущий климат на основе пространственной линейной интерполяции по четырем ближайшим узлам географической сетки, для которых есть расчетные данные по МОЦАО (см. выше). С помощью процедуры линейной интерполяции строился годовой ход среднесуточной температуры по перспективным оценкам среднемесячных значений температуры.

Предварительно для пункта расположения каждой метеостанции для периода 1961–2003 гг. были вычислены коэффициенты линейной регрессии фактического числа дней N в году с “высокой и более” горимостью ($G > 1000$) на годовую сумму положительных среднесуточных значений температуры.

Далее для каждой из 1400 метеостанции годовой ход среднесуточных значений температуры в каждый год t пересчитывался в число дней с “высокой и более” горимостью $N^*(t)$ с помощью этих коэффициентов регрессии. Изменения N в какой-либо год t по отношению к значениям базового (b) периода 1961–1990 гг. оценивались в процентах:

$$\Delta_{\%} N^* = 100(N^*(t) - N_b^*)/N_b^*$$

где N_b^* — среднее значение за базовый период.

3.1.10.4. Наводнения

Перспективные оценки вероятности и параметров наводнений основываются на учете многих факторов. Важнейшими из них являются количество, распределение и интенсивность выпадения

атмосферных осадков, запасы воды в снежном покрове и интенсивность его таяния во время половодья и паводков на реках, продолжительность и скорость ветра при нагонах воды и тайфунах и т. д. Расчеты с помощью большинства МОЦАО указывают на то, что повышение температуры воздуха, особенно в высоких широтах, может быть значительным по сравнению с глобальным потеплением в XX веке. Однако перспективные оценки сумм осадков из-за их большей пространственной и временной изменчивости обладают большей степенью неопределенности. Поэтому количественные предсказания для наводнений даже на ближайшие годы проблематичны. Можно делать только оценки направленности изменений, их вероятности и параметров по прогнозируемым изменениям осадков.

Оценки возможных изменений сумм осадков при глобальном потеплении, полученные с помощью разных моделей, существенно различаются как по величине, так и по знаку, но практически по данным всех моделей (Allen and Ingram, 2002; Palmer and Rätsänen, 2002; Milly et al., 2002) ожидается увеличение суммы осадков в высоких и умеренных широтах, особенно в зимний период, а результаты расчетов по некоторым моделям указывают на значительное увеличение повторяемости экстремальных осадков (Milly et al., 2002). Это необходимо учитывать для большей части территории России при оценках риска опасных наводнений в будущем при весенних и весенне-летних половодьях на больших и средних реках, в том числе с образованием ледовых заторов, и вероятности наводнений при дождевых паводках на малых и средних реках.

В горных районах Кавказа, Алтая, Саян сохранение тенденции увеличения ливневых осадков при одновременном уменьшении площади горного оледенения и снежников обусловит увеличение частоты формирования дождевых паводков и селевых потоков как дождевого, так и моренно-прорывного (гляциального) происхождения. Для больших и средних рек горных и предгорных районов на Урале и в Сибири необходимо учитывать увеличение опасности высоких наводнений при выпадении обильных осадков во время половодья.

На территории с муссонным климатом на Дальнем Востоке и частично в Восточной Сибири ожидаемое увеличение количества осадков также необходимо учитывать при оценке вероятности высоких наводнений на реках в XXI веке. Деграляция многолетней мерзлоты в горных районах будет способствовать формированию селевых потоков.

Для определения предельной высоты и продолжительности наводнений с учетом генезиса их формирования в разных географических условиях

на территории России можно использовать результаты расчетов, выполненных по данным многолетних наблюдений за водным режимом рек. Они опубликованы в справочных изданиях Росгидромета (гидрологических ежегодниках, гидрохимических бюллетенях) при ведении Государственного водного кадастра. Для этой цели можно использовать также результаты специальных расчетов региональных гидрологических характеристик наводнений (Доброумов, Тумановская, 2002).

Районирование территории России для оценки опасности наводнений, весенних половодий и дождевых паводков (для ситуаций отсутствия заторов льда) приведено в работе (Доброумов, Тумановская, 2002). Оно основано на данных многолетних наблюдений водного режима рек, опубликованных в справочных изданиях Росгидромета, и на результатах расчетов гидрологических характеристик. При этом был выявлен преобладающий тип процессов формирования максимального стока (весеннее половодье, весенне-летнее половодье, снегодождевые и дождевые паводки) для значений, превышающих $X_{0,1}$ (верхний 10%-ный квантиль, см. раздел 2.1.1), и установлены начальные наименьшие значения площади водосборов рек, для которых этот тип характерен.

Наводнения с максимальным стоком при весеннем половодье характерны для западной части России, а с максимальным стоком при весенне-летнем половодье — для восточной; их границей является р. Енисей. Наводнения с максимальным стоком дождевого происхождения распространены на Кавказе, в Забайкалье и на Дальнем Востоке (в Приморье); смешанный тип характерен для Алтая и Саян. Для всех рек, бассейны которых расположены севернее 58° с. ш., наибольшие подъемы уровней воды могут быть обусловлены заторами льда (Доброумов, Тумановская, 2002).

Дополнительно этими авторами выполнено районирование территории России по показателю превышения максимальными срочными расходами воды стока их средних многолетних значений, больших $X_{0,01}$ (верхний 1%-ный квантиль). Районирование было выполнено отдельно для весеннего половодья и дождевых паводков. Рассчитана также средняя продолжительность стояния воды на поймах рек при формировании максимумов весеннего половодья и дождевых паводков в этом случае.

Результаты районирования позволяют уже на первом этапе оценок определить для отдельных районов России генезис формирования наводнений и выделить речные водосборы (по площади бассейна), на которых проявление наводнений может быть наиболее опасным. Так, весенние половодья, расходы воды при которых превышают значение $X_{0,01}$, на большей части территории России могут представлять наибольшую опасность на

реках с площадями водосбора более 50 тыс. км². Продолжительность затопления пойменных участков на таких реках может составить 12–24 суток, а наибольшие в период наводнения расходы воды могут превысить их средние многолетние значения более чем в два раза. Ситуация в период наводнений для этих рек может быть существенно ухудшена влиянием заторов льда. На юге Европейской части России и Западной Сибири наиболее опасные ситуации в период весеннего половодья также могут возникнуть на реках с площадями водосборов более 50 тыс. км². При этом продолжительность затопления пойменных участков будет от 18 до 32 суток, а максимальные расходы воды превысят средние многолетние более чем в 5 раз.

Наводнения дождевого происхождения со значениями стока, превышающими $X_{0,01}$, могут быть наиболее опасными на Кавказе и Дальнем Востоке. Продолжительность затопления поймы в этих районах для рек с площадью водосбора в диапазоне от 1000 км² до 50 тыс. км² может быть от 5 до 9 суток, а наибольшие в период наводнения расходы воды более чем в три раза могут превысить их средние многолетние значения (Доброумов, Тумановская, 2002).

На всей территории России большую опасность представляют дождевые паводки редкой повторяемости на малых водосборах площадью 25–50 км² и менее. Дождевые паводки в летне-осенний период приводят к затоплению сельскохозяйственных угодий, наносят значительный ущерб, снижая урожайность возделываемых культур, а зачастую приводя к их гибели.

Таким образом, разделение наводнений по генезису их формирования на 4 типа, районирование территории России по генезису формирования наводнений и показателю превышения наибольших расчетных максимумов срочных расходов воды позволяют выделять наиболее опасные для наводнений речные водосборы.

3.1.11. Литература

- Абузьяров З. К., 2003.** Технология прогноза тенденций изменения уровня Каспийского моря на перспективу 6 и 18 лет, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеиздат, с. 351–363.
- Александров В. А., 2006.** Колебания и изменения климата и их влияние на экосистемы Юго-Восточной и Центральной Европы, а также юго-восточных районов США, Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, СПб, 98 с.
- Ананичева М. Д., Кренке А. Н., 2005.** Эволюция высот климатической снеговой линии и границы питания ледников на северо-востоке Сиби-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

- ри в XX веке, Материалы гляциологических исследований, вып. 98, с. 225–233.
- Ананичева М. Д., Кренке А. Н., 2007.** Горное оледенение (на примере северо-востока Сибири и Камчатки). Глава 6. Оледенение Северной Евразии в ближайшем будущем, в кн.: Оледенение Северной и Центральной Евразии: от прошлого к ближайшему будущему, М., Наука (в печати).
- Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., 2002.** Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России, Метеорология и гидрология, № 6, с. 15–22.
- Анисимов О. А., Лавров С. А., 2004.** Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК, Технологии ТЭК, № 3, с. 78–83.
- Борзенкова И. И., Будыко М. И., Бютнер Э. К. и др., 1987.** Антропогенные изменения климата, Л., Гидрометеиздат, 406 с.
- Ваганов Е. А., Шашкин А. В., 2000.** Рост и структура годичных колец хвойных, Новосибирск, Наука, 232 с.
- Величко А. А., Борисова О. К., Зеликсон Э. М., Морозова Т. Д., 2002.** К оценке изменений в состоянии растительного и почвенного покровов Восточно-Европейской равнины в XXI веке вследствие антропогенного изменения климата, в кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, СПб, Гидрометеиздат, т. XVIII, с. 208–220.
- Винокуров Г. М., 1949.** Метод прогноза начала отрождения вредных саранчовых Сибири, Труды Алтайской станции защиты растений, т. 1, Барнаул.
- Георгиевский В. Ю., Ежов А. В., Шалыгин А. Л., Шикломанов И. А., Шикломанов А. И., 1996.** Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР, Метеорология и гидрология, № 11, с. 89–99.
- Глазовский А. Ф., Носенко Г. А., Цветков Д. Г., 2005.** Ледники Урала: современное состояние и перспектива эволюции, Материалы гляциологических исследований, вып. 98, с. 207–213.
- Грингоф И. Г., Пасечнюк А. Д., 2005.** Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения, СПб, Гидрометеиздат, 552 с.
- Гудкович З. М., Карклин В. П., Фролов И. Е., 2005.** Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова Евразийских арктических морей и их возможные причины, Метеорология и гидрология, № 6, с. 5–14.
- Доброумов Б. М., Тумановская С. М., 2002.** Наводнения на реках России: их формирование и районирование, Метеорология и гидрология, № 12, с. 70–78.
- Жуков В. А., Святкина О. А., 2000.** Стохастическое моделирование и прогноз агроклиматических ресурсов при адаптации сельского хозяйства к региональным изменениям климата на территории России, Метеорология и гидрология, № 1, с. 100–109.
- Захаров В. Ф., 2003.** Изменение в распространении морских арктических льдов в XX веке, Метеорология и гидрология, № 5, с. 75–86.
- Злотников М. Д., 1967.** Возможный ареал распространения и сроки развития колорадского жука в Европейской части СССР, Труды Всесоюзного научно-исследовательского института защиты растений, вып. 27, с. 68–74.
- Израэль Ю. А., Павлов А. В., Анохин Ю. А., Мяч Л. Т., Шерстюков Б. Г., 2006.** Статистические оценки динамики изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации, Метеорология и гидрология, № 5, с. 27–38.
- Израэль Ю. А., Анохин Ю. А., Мяч Л. Т., Шерстюков А. Б., 2007.** Оценка и прогноз возможного изменения климата и состояния вечной мерзлоты на территории Российской Федерации в XXI веке, в кн.: Материалы международной конференции “Криогенные ресурсы полярных регионов”, Салехард, 17–22 июня 2007 г., Салехард, Материалы, т. 1, с. 127–132.
- Карклин В. П., Юлин А. В., Карелин И. Д., Иванов В. В., 2001.** Климатические колебания ледовитости арктических морей сибирского шельфа, Труды ААНИИ, т. 443, с. 5–11.
- Каталог ледников СССР:** т. 17 (Лено-Индигоирский район), вып. 2, часть 2 (Орулган), 1972, 43 с.; т. 19 (Северо-восток), часть 3, 1981; т. 20 (Камчатка), части 2–4, 1969, 74 с.
- Кожаринов А. В., Минин А. А., 2001.** Современные тенденции в состоянии природы Русской равнины, в кн.: Влияние изменения климата на экосистемы. Охраняемые природные территории России: анализ многолетних наблюдений, под ред. А. Кокорина, А. Кожаринова, А. Минина, М., ч. 1, с. 17–23.
- Кренке А. Н., Чернавская М. М., 2003.** Районирование России по сочетанию климатических экстремумов, Известия РАН, сер. географ., № 2, с. 17–26.
- Ларченко К. И., 1958.** Длительность развития колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say) в зависимости от температуры, в сб.: Колорадский жук и меры борьбы с ним, т. 2, М., Изд-во АН СССР, с. 81–92.
- Лемешко Н. А., 2002.** Гидрологический режим суши при удвоении концентрации углекислого газа в атмосфере, в сб.: Изменения климата и их последствия, СПб, Наука, с. 251–259.
- Макштас А. П., Назаренко Л. С., Шутилин С. В., 1988.** Модель морского ледяного покрова Арк-

- тического бассейна, в сб.: Математические модели в исследовании динамики океана, Новосибирск, Сибирское отделение АН СССР, Вычислительный центр, с. 96–116.
- Мальшев Л. И., Байков К. С., Доронькин В. М., 2000.** Флористическое деление Азиатской России на основе количественных признаков, *Krylovia*, т. 2, № 1, с. 3–16.
- Мелешко В. П., Голицин Г. С., Говоркова В. А. и др., 2004.** Возможные антропогенные изменения климата России в XIX веке: оценки по ансамблю климатических моделей, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 38–49.
- Менжулин Г. В., Шамшуринов В. И., Саватеев С. П., 2005.** К оценке точности модельных сценариев изменений климата, рекомендованных комиссией ИРСС для расчетов последствий глобального потепления, в кн.: Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии, СПб, Наука, с. 55–85.
- Мещерская А. В., Голод М. П., 2003.** О статистических долгосрочных прогнозах уровня Каспийского моря с использованием крупномасштабных климатических параметров, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеоиздат, с. 278–294.
- Михаленко В. Н., Кутузов С. С., Файзрахманов Ф. Ф. и др., 2005.** Сокращение оледенения Тянь-Шаня в XIX — начале XXI века: результаты кернового бурения и изменения температуры в скважинах, *Материалы гляциологических исследований*, вып. 98, с. 173–182.
- Отчет ГГО о научно-исследовательской работе “Новые методы анализа и обоснованные оценки многолетних изменений гидрометеорологических условий в северной полярной области, фоновый прогноз состояния атмосферы и океана на ближайшие десятилетия, выявление естественной и антропогенной составляющих изменений климата”, 2005.** Отв. исполнитель В. М. Катцов, СПб, 31 с.
- Панов В. Д., 1993.** Эволюция современного оледенения Кавказа, СПб, Гидрометеоиздат, 431 с.
- Парфенова Е. И., Чебакова Н. М., 2006.** Представление климатописического разнообразия в ГИС и анализ его влияния на биоразнообразие различных уровней организации растительности, в кн.: Биоразнообразие и динамика экосистем. Информационные технологии и моделирование, Новосибирск, Сибирское отделение РАН, вып. 7, с. 536–546.
- Приоритетные действия по адаптации энергетики, строительной отрасли и здравоохранения РФ в условиях текущих и предполагаемых изменений климата на период действия Киотского протокола и на перспективу после 2015 г., 2005.** Отчет о научно-исследовательской работе по договору № 63/205 от 15 ноября 2005 г., выполненной в рамках НИР по ЛОТу 3, 1, 32 с.
- Ревич Б. А., Шапошников Д. А., 2006.** Климатические условия, качество атмосферного воздуха и смертность населения Москвы в 2000–2006 годах, в кн.: Климат, качество атмосферного воздуха и здоровье москвичей, под ред. Б. А. Ревича, М., Издательское товарищество “АдамантЪ”, с. 102–140.
- Романенков В. А., Сиротенко О. Д., Романенко И. А., Шевцова Л. К., Рожков В. А., Рухович Д. И., Франко У., Смит П., 2003.** Оценка потенциального влияния климатических изменений на запас углерода пахотных почв, Тезисы докладов Всемирной конференции по изменению климата, Москва, 29 сентября — 3 октября 2003 г., М., ИГКЭ, с. 243.
- Рубцов И. А., 1935.** Районирование резерваций саранчовых Сибири и прогноз массовых размножений по коэффициентам увлажнения, в кн.: Вредители и болезни сельскохозяйственных растений Восточной Сибири.
- Сафарова И. Л., 1987.** Особенности эмбрионального развития итальянской саранчи, в кн.: Саранчовые — экология и меры борьбы. Сборник научных трудов, Л., ВАСХНИЛ, ВНИИ защиты растений, с. 75–83.
- Семенов С. М., 2004.** Парниковые газы и современный климат Земли, М., Издательский центр “Метеорология и гидрология”, 175 с.
- Семенов С. М., Ясюкевич В. В., Гельвер Е. С., 2006.** Выявление климатогенных изменений, М., Издательский центр “Метеорология и гидрология”, 325 с.
- Сергиев В. П., Баранова А. М., Маркович Н. Я., Супряга В. Г., Ганнушкина Л. А., 2004.** Возможное влияние изменения климата на распространение трансмиссивных болезней на территории России, в кн.: Изменение климата и здоровье России в XXI веке. Сборник материалов Международного семинара (5–6 апреля 2004 г.), под ред. Н. Ф. Измерова, Б. А. Ревича, Э. И. Коренберга, М., Издательское товарищество “АдамантЪ”, с. 143–147.
- Сиротенко О. Д., Павлова В. Н., 2003.** Оценка влияния изменений климата на сельское хозяйство методом пространственно-временных аналогов, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 89–99.
- Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Романенков В. А., 2005.** Моделирование влияния изменений климата на динамику органического углерода в пахотных почвах, эмиссию CO₂ и продуктивность агроэкосистем, *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 83–95.
- Соломина О. Н., Абылмеизова Б., Грязнова В. В., Ершова И. В., 2007.** Реконструкция гидротермического коэффициента в 1680–2005 гг. по дендрохронологическим данным в Прииссык-

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

- кулье, Тянь-Шань, Республика Кыргызстан, в кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXI, СПб, Гидрометеиздат, с. 183–202.
- Цельникер Ю. Л., Корзухин М. Д., Суворова Г. Г., Янькова Л. С., Копыткова Л. Д., Филиппова А. К., 2007.** Анализ влияния факторов среды на фотосинтез хвойных Предбайкалья, в кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, СПб, Гидрометеиздат, т. XXI, с. 265–292.
- Цыпленков Е. П., 1970.** Вредные саранчовые насекомые в СССР, Л., Колос, 272 с.
- Шашко Д. И., 1985.** Агроклиматические ресурсы СССР, Л., Гидрометеиздат, 247 с.
- Шерстюков Б. Г., 2003.** Метеорологические факторы горимости леса, засушливости погоды во второй половине XX века и экстремальные условия 2002 года в Московском регионе. Анализ климатической изменчивости и оценки возможных изменений климата, Труды ВНИИГМИ-МЦД, вып. 171, с. 79–88.
- Шигалев А. А., Шиманюк А. П., 1949.** Сезонное развитие природы Европейской части СССР, М., Географгиз, 240 с.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 1995.** Влияние антропогенных факторов на сток рек бывшего СССР, в кн.: Географические направления в гидрологии, М., РАН, с. 96–107.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 2002.** Влияние антропогенных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы, в кн.: Изменения климата и их последствия, СПб, Наука, с. 152–164.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 2003.** Влияние климатических изменений на водные ресурсы и водный режим рек России, Тезисы докладов Всемирной конференции по изменению климата, Москва, 29 сентября — 3 октября 2003 г., М., ИГКЭ, с. 250.
- Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., 2004.** Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата, Тезисы докладов VI Всероссийского гидрологического съезда, Санкт-Петербург, 28 сентября — 1 октября 2004 г., СПб, Гидрометеиздат, секция 3, с. 200–201.
- Шишов В. В., Наурызбаев М. М., Ваганов Е. А., Ивановский А. Б., Корец М. А., 2007.** Анализ изменчивости радиального прироста древесных растений на территории севера Евразии в последние десятилетия, Известия РАН, сер. географ., № 3, с. 49–58.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Павлова Т. В., 2000.** Региональная гидродинамическая модель атмосферы для исследования климата на территории России, Метеорология и гидрология, № 4, с. 32–49.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Гаврилина В. М., 2005.** Валидация региональной климатической модели ГГО, Метеорология и гидрология, № 1, с. 14–27.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Катцов В. М., 2006.** Возможные изменения климата на Европейской части России и сопредельных территориях к концу XXI века: расчет с региональной моделью ГГО, Метеорология и гидрология, № 3, с. 5–16.
- Ясюкевич В. В., Попова Е. Н., Гельвер Е. С., Ривкин Л. Е., 2007.** Влияние климатических факторов на формирование ареала колорадского жука (*Leptinotarsa decemlineata* Say), в кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. 21, СПб, Гидрометеиздат, с. 348–379.
- Alfaro A., 1943.** Un ciclo de desarrollo en el escarabajo de la patata, Bol. pathol. veget. y entomol. agric, No. 12, pp. 9–30.
- Alfaro A., 1949.** Algunos aspectos de la biologia del escarabajo de la patata (*Leptinotarsa decemlineata* Say), Bol. pathol. veget. y entomol. agric, No. 16, pp. 91–104.
- Allen M. R. and Ingram W. J., 2002.** Constraints on future changes in climate and the hydrological cycle, Nature, vol. 415, pp. 224–232.
- Anisimov O. A., Shiklomanov N. I., and Nelson F. E., 2002.** Variability of seasonal thaw depth in permafrost regions: A stochastic modeling approach, Ecological Modeling, vol. 153, No. 3, pp. 217–227.
- Beaubien E. G. and Johnson D. L., 1994.** Flowering plant phenology and weather in Alberta, Canada, Int. J. Biometeorol., vol. 38, pp. 23–27.
- Budyko M. I., 1974.** Climate and Life, New York, Academic Press, 508 p.
- Budyko M. I., 1986.** The Evolution of the Biosphere, Dordrecht, D. Reidel Publishing Company, 423 p.
- Climate Change 2001, 2001.** Synthesis Report. Contributions of Working Group I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, Watson R. T. and the Core Writing Team (eds.), Cambridge University Press, 397 p.
- Climate Change 2001, 2001a.** The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., et al. (eds.), Cambridge University Press, 881 p.
- Climate Change 2001, 2001b.** Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, McCarthy J. J. et al. (eds.), Cambridge University Press, 1032 p.
- Climate Change 2007, 2007.** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S. D., Qin M., Manning Z., Chen M., Marquis K. B., Averyt M.,

- Tignor M., and Miller H. L. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 996 p.
- Dyurgerov M. B., 2001.** Mountain glaciers at the end of the twentieth century: Global analysis in relation to climate and water cycle, *Polar Geography*, vol. 25, pp. 241–336.
- Evans M. N., Reichert B. K., Kaplan A., Anchukaitis K. J., Vaganov E. A., Hughes M. K., and Cane M. A., 2006.** A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data, *J. Geophys. Res., Biogeosciences*, vol. 111, No. 63, G03008, doi:10.1029/2006JG000166.
- Frolov I. E., Gudkovich Z. M., and Karklin V. P., 2007a.** Long-term variability of sea ice in the Eurasian Arctic, in: *Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route*, sec. 7.1, Chichester, UK, Praxis Publishing Ltd., pp. 398–409.
- Frolov I. E., Gudkovich Z. M., and Karklin V. P., 2007b.** 21st century sea ice scenarios: Statistical modeling, in: *Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route*, sec. 7.3, Chichester, UK, Praxis Publishing Ltd., pp. 418–420.
- Izrael Yu. A. and Semenov S. M., 2006.** Critical levels of greenhouse gases, stabilization scenarios, and implications for the global decisions, in: *Avoiding Dangerous Climate Change*, Schellnhuber J. S., Cramer W., Nakicénović N., Wigley T. M. L., and Yohe G. (eds.), Cambridge, Cambridge University Press, pp. 73–79.
- Lappalainen H., 1994.** Examples of plant phenological events in Finland and their relation to temperature, *Memoranda Soc. Fauna Flora Fennica*, vol. 70, pp. 105–121.
- Lieshout van M., Kovats R. S., Livermore M. T. J., and Martens P., 2004.** Climate change and malaria: Analysis of the SRES climate and socio-economic scenarios, *Global Environmental Change*, vol. 14, pp. 87–99.
- Lindsay R. W. and Zhang J., 2005.** The thinning of Arctic sea ice: Have we passed a tipping point? *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, vol. 86, No. 3, pp. 325–326.
- Lobell D. and Field C. B., 2007.** Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming, *Environ. Res. Lett.*, No. 2, pp. 1–7.
- McAvaney B. J., Covey C., Joussaume S., et al., 2001.** Model evaluation, in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton J. T., Ding Y., et al. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, pp. 471–523.
- McFarlane N. A., Boer G. J., Blanchet J.-P., and Lazare M., 1992.** The Canadian Climate Centre second-generation general circulation model and its equilibrium climate, *J. Climate*, vol. 5, pp. 1013–1044.
- Milly P. C. B., Wetherald R. T., Dunne K. A., and Delworth T. L., 2002.** Increasing risk of great floods in a changing climate, *Nature*, vol. 415, pp. 514–517.
- Monserud R. A., Tchebakova N. M., and Leemans R., 1993a.** Global vegetation change predicted by the modified Budyko model, *Climatic Change*, vol. 25, pp. 59–83.
- Monserud R. A., Denissenko O. V., and Tchebakova N. M., 1993b.** Comparison of Siberian paleovegetation to current and future vegetation under climate change, *Climate Res.*, vol. 3, pp. 143–159.
- Nelson F. E., Anisimov O. A., and Shiklomanov N. I., 2001.** Subsidence risk from thawing permafrost, *Nature*, vol. 410, pp. 889–890.
- Nelson F. E., Anisimov O. A., and Shiklomanov N. I., 2002.** Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions, *Natural Hazards*, vol. 26, No. 3, pp. 203–225.
- Palmer T. N. and Rätsänen J., 2002.** Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate, *Nature*, vol. 415, pp. 512–514.
- Pope V. D., Gallani M. L., Rowntree P. R., and Stratton R. A., 2000.** The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model — HadAM3, *Climate Dynamics*, vol. 16, pp. 123–146.
- Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Christoph M., Claussen M., Dümenil L., Esch M., Giorgetta M., Schlese U., and Schulzweida U., 1996.** The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, Rep. No. 218, 90 p.
- Special Report on Emission Scenarios (N. Nakicénović et al. (eds.)), 2000.** A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 599 p.
- Tchebakova N. M., Monserud R. A., Leemans R., and Golovanov S., 1993.** A global vegetation model based on the climatological approach of Budyko, *J. Biogeography*, No. 20, pp. 129–144.
- Vaganov E. A., Hughes M. K., and Shashkin A. V., 2006.** Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments, Springer, Ecol. Studies Ser., vol. 183, 354 p.
- Weller G. and Lange M. (eds.), 1999.** Impacts of Global Climate Change in the Arctic Regions. Report from a Workshop on the Impacts of Global Climate Change, 25–26 April 1999, Tromsø, Norway, International Arctic Science Committee, Oslo, 59 p.
- Wigley T. M. L., Richels R., and Edmonds J., 1996.** Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentration, *Nature*, vol. 379, p. 242.
- Wigley T. M. L., 2004.** Choosing a stabilization target for CO₂, *Climatic Change*, vol. 67, pp. 1–11.