

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 556.048

### МЕТОДИКА СЦЕНАРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА СЕВЕРНЫХ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ В СВЯЗИ С ВОЗМОЖНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА<sup>1</sup>

© 2013 г. Е. М. Гусев, О. Н. Насонова

*Институт водных проблем РАН*

*119333 Москва, ул. Губкина, 3*

*E-mail: sowaso@yandex.ru*

Поступила в редакцию 31.01.2012 г.

Разработана методика сценарного прогнозирования изменения составляющих водного баланса бассейнов северных рек в связи с возможным изменением климата. Методика основана на использовании модели тепло- и массообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP. Для четырех климатических сценариев МГЭИК, соответствующих заданным сценариям экономического, технологического, политического и демографического развития человеческой цивилизации, рассчитаны прогностические варианты динамики метеорологических элементов в бассейне р. Северная Двина в XXI в., на основе которых были получены оценки возможного изменения осадков, испарения и стока с бассейна р. Северной Двины до 2063 г.

*Ключевые слова:* составляющие водного баланса, сценарии изменения климата, взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью суши, физико-математическое моделирование, глобальные базы данных, бассейны северных рек

DOI: 10.7868/S0321059613040044

Поступление пресной воды в Северный Ледовитый океан в виде речного стока с дренажной территории пан-Арктического бассейна составляет примерно 50% ее суммарного поступления [18]. Для других океанов это соотношение гораздо ниже, поскольку среди приходных составляющих пресных вод, как правило, доминируют осадки, выпадающие на поверхность океанов. Результаты использования климатических моделей в целом свидетельствуют о том, что прогнозируемое глобальное потепление в наибольшей степени будет сказываться именно на высоких северных широтах, приводя к увеличению в этой зоне осадков и усилению снеготаяния [24]. Вызванные этими факторами изменения гидрологического режима территории пан-Арктического бассейна могут оказать значительное влияние как на водно-солевой баланс самого Арктического бассейна, так и на водный баланс его дренажной территории, что скажется и на функционировании экосистем данного региона. В частности, арктические почвы играют важную роль в глобальном балансе дву-

окси углерода и метана, потоки которых очень чувствительны к изменениям влажности и температуры почвы [31]. Это обстоятельство может определить и интенсивность обратной положительной связи климатических изменений и изменений окружающих экосистем. Влияние возможного изменения климата на гидрологический режим пан-Арктического бассейна может привести к значительным изменениям стока как во внутригодовой динамике, так и в его годовых объемах [4, 17, 27, 33]. Оценка влияния глобального потепления на гидрологический цикл и динамику его составляющих в арктическом регионе только начинает проводиться. Полученные предварительные результаты неоднозначны и требуют дальнейших исследований, включающих в себя и разработку более точных методик оценки указанных изменений.

В связи с этим цель настоящей работы – построение методики сценарного прогнозирования изменения составляющих водного баланса бассейнов северных рек. Апробация предлагаемой методики проведена при исследовании возможных изменений (до 2063 г.) составляющих водного баланса одной из рек пан-Арктического регио-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-00015) и РАН (Государственный контракт № 740К/11-5).

на, а именно Северной Двины, расположенной в северной части Европейской части России (ЕЧР).

### БАССЕЙН СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

Северная Двина (рис. 1а) — одна из крупных рек ЕЧР, принадлежащих пан-Арктическому бассейну. Площадь ее водосбора — 357 тыс. км<sup>2</sup>, средний годовой слой стока в устье реки — 309 мм. Начинается Северная Двина от слияния рек Сухоны и Юг. Наиболее крупные ее правые притоки — реки Вычегда и Пинега, левые — реки Вага и Емца.

Климат на территории бассейна Северной Двины довольно суровый. Средняя температура воздуха в январе составляет –13...–15°С (понижается в отдельные дни до –45°С), в июле 14–17°С.

Бассейн Северной Двины расположен в зоне избыточного увлажнения. Средняя годовая сумма осадков изменяется от 650 мм на севере до 800 мм на юго-западе. Средняя годовая величина испарения изменяется по территории, уменьшаясь в направлении с юга на север примерно с 550 до 400 мм. Северная Двина относится к рекам преимущественно снегового питания, хотя в теплый период года выпадает 65–70% годового количества осадков (значительное количество которых расходуется на испарение). Зимой осадков значительно меньше, но они формируют довольно большие снеготопления. Максимальные снеготопления характеризуются значительной межгодовой изменчивостью.

Почвы на территории бассейна подзолистые, дерново-подзолистые и болотно-подзолистые. Леса преимущественно хвойные, занимают ~ 80% водосбора.

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ СЦЕНАРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА СЕВЕРНЫХ РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ В СВЯЗИ С ВОЗМОЖНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА

В основу методики решения указанной задачи были положены: модель взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой Soil Water–Atmosphere–Plants (SWAP) [6], разработанная авторами настоящей работы и адаптированная под использование для расчета речного стока и других составляющих водного баланса бассейнов северных рек; глобальные базы данных по характеристикам подстилающей поверхности суши, а именно: параметрам почвы, растительного покрова и геоморфологическим характеристикам рассматриваемой территории, подвергшимся уточнению на

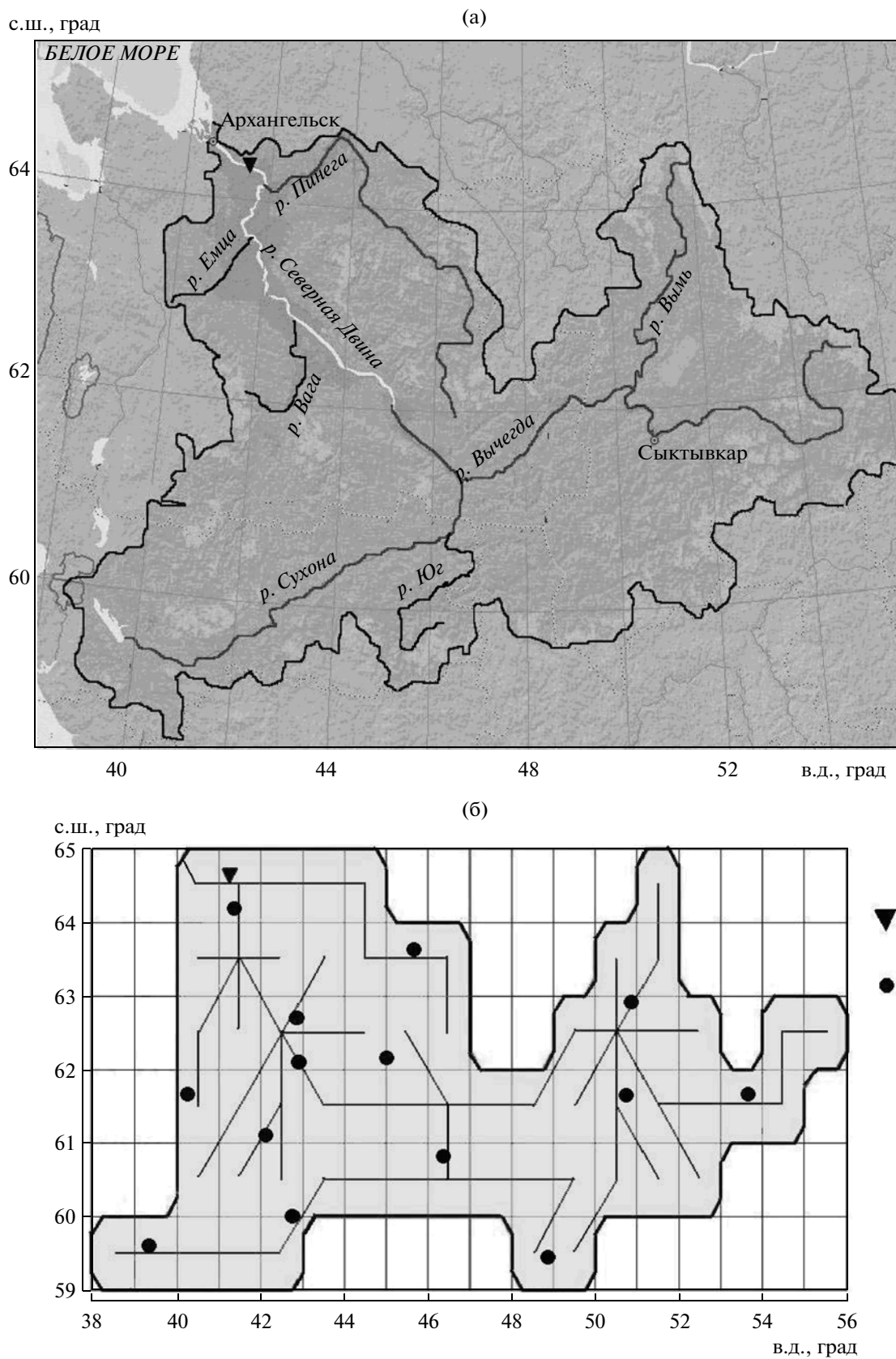
основе оптимизации наиболее важных параметров; сценарные прогнозы изменения метеорологических характеристик в районе рассматриваемых бассейнов в XXI в., основанные на изменении выброса парниковых газов и аэрозолей в атмосферу в соответствии с тем или иным сценарием социального-экономического развития человеческой цивилизации.

#### *Модель взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP*

Предварительные результаты построения методики моделирования гидрографа стока северных рек, основанной на использовании LSM (Land Surface Model) модели тепло- и влагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP, изложены в [6, 11, 22, 23]. Сама модель SWAP представлена, в частности, в [6, 21]. В ее основу положено физико-математическое описание процессов тепло- и влагообмена, происходящих в системе грунтовые воды — почва — растительный/снежный покров — приземный слой атмосферы, а также описание трансформации гидрографов стока воды как в процессе ее движения в русловую сеть по элементам поверхности речного бассейна, так и в самой русловой сети. Модель позволяет рассчитывать составляющие водного и теплового балансов наземных экосистем и речных бассейнов, имеющих разные пространственные масштабы и находящихся в различных природных условиях. Необходимое при проведении расчетов информационное обеспечение модели SWAP включает в себя приземную метеорологическую информацию с временным разрешением меньше суток (обычно 3-часовую) и характеристики подстилающей поверхности: параметры почвы и растительного покрова, топографические характеристики бассейна. Для модельных расчетов была проведена схематизация бассейна Северной Двины (до стоковой ст. Усть-Пинега) в виде совокупности 62 ячеек с пространственным разрешением 1° × 1° (рис. 1б).

#### *Обеспечение модели SWAP метеорологической информацией для адаптации модели и оценки эффективности модельного расчета стока Северной Двины в современный период*

Метеорологической информацией, определяющей верхнее граничное условие при решении поставленной задачи, послужили 3-часовые данные стандартных наблюдений метеорологических станций, расположенных в бассейне Северной Двины: температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, атмо-



**Рис. 1.** Бассейн р. Северная Двина (а) и его схематизация (б). 1 – стоковая ст. Усть-Пинега, 2 – метеорологические станции [11].

сферные осадки, облачность [11]. При этом для расчета составляющих водного баланса за 1967–1998 гг. использовались непосредственно данные наблюдений, для расчетов последующего периода (до 1963 г.) была разработана соответствующая методика (приведенная ниже), также в какой-то степени использующая метеорологическую информацию за 1967–1998 гг. Необходимые 3-часовые значения приходящей коротковолновой радиации в местах расположения метеорологических станций вычислялись по методике, разработанной А.Б. Шмакиным (ИГ РАН) [34]. Исходной информацией при этом служили данные о приземном давлении, географической широте места, солнечном склонении, а также среднесуточные значения коэффициента прозрачности атмосферы [16]. Далее полученные значения солнечной радиации при безоблачном небе корректировались с учетом общей облачности [6]. Значения приходящей длинноволновой радиации были рассчитаны по методике, изложенной в [7].

Интерполяция метеорологических элементов в центры ячеек бассейна реки осуществлялась с использованием процедуры кригинга [10].

#### *Подготовка данных по параметрам подстилающей поверхности*

Параметры растительного покрова и почвы, а также топографические характеристики бассейнов были взяты из глобальных баз данных, как и в [6, 10, 22, 23]. При создании базы данных о растительном покрове, адаптированной под модель SWAP, за основу была принята глобальная база данных из проекта Second Global Soil Wetness Project (GSWP-2) [10, 36, 23]. При этом использовалась классификация типов подстилающей поверхности International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), включающая в себя 17 типов поверхности суши. База данных была скорректирована для устранения грубых несоответствий и ошибок, а также дополнена рядом специфических параметров, необходимых для работы с моделью SWAP. Подробности указанной корректировки, а также перечень параметров растительного покрова, используемых в модели SWAP, приведены в [9].

При подготовке адаптированной под модель SWAP базы данных по почвенным параметрам за основу были приняты данные из информационной базы International Satellite Land-Surface Climatology Project Initiative II (ISLSCP-II)/GSWP-2, которые, в свою очередь, взяты из Data Information System (IGBP-DIS). Указанные данные также были частично скорректированы в целях устранения

неправдоподобных значений ряда параметров и согласования их между собой и с параметрами растительного покрова [9].

Для расчетов трансформации стока в пределах расчетной ячейки необходимы топографические характеристики, включающие в себя среднюю высоту ячейки и углы наклона поверхности ячейки в меридиональном и широтном направлениях. Высоты были взяты из информационной базы Центра данных по системам наблюдений за ресурсами Земли (Earth Resources Observation Systems Data Center – EDC), углы наклона были рассчитаны по данным о средних высотах соседних ячеек.

Полученное в результате информационное обеспечение оказывается разнородным по точности, надежности и достоверности в отношении различных групп данных. Поэтому для обеспечения достаточно высокого (по гидрологическим требованиям) качества результатов расчетов необходима оптимизация некоторых наиболее важных модельных параметров.

#### *Оптимизация основных модельных параметров*

В настоящей работе, в отличие от ряда других [6, 10, 23], оптимизировались только параметры подстилающей поверхности (без ведения корректирующих множителей к осадкам и радиации). Выбор и обоснование набора характерных для водосборов северных рек параметров, к которым должна быть применена процедура оптимизации, детально изложен в [10].

При проведении процедуры оптимизации калибровалось 8 параметров подстилающей поверхности бассейна. К ним относились, в частности, корректирующие множители (общие для всего бассейна) к значениям коэффициента фильтрации почвы  $K_0$ , толщины корнеобитаемого слоя  $h_r$  и к двум значениям альбедо подстилающей поверхности в теплый (бесснежный) ( $alb_{sum}$ ) и холодный ( $alb_{win}$ ) периоды для каждой ячейки, обозначенные  $k_{K0}$ ,  $k_{hr}$ ,  $k_{albsum}$  и  $k_{albwin}$  соответственно. Кроме того, принималось, что для каждой ячейки расстояние от поверхности почвы до глубины практически водонепроницаемого слоя следующее:  $h_0 = k_{h0}h_r$ , где  $k_{h0}$  – множитель, общий для всего бассейна, который также калибровался. И, наконец, калибровались такие параметры, как альбедо свежеснежного покрова  $alb_{sn}$ , коэффициент шероховатости  $n$  в формуле Маннинга и эффективная скорость движения воды в русле  $u_e$ .

Исходной информацией для уточнения указанных параметров путем их оптимизации послужили измеренные значения суточного стока Северной

Двины за 1986–1990 гг. в районе ст. Усть-Пинега. Оптимизация проводилась с использованием автоматизированного алгоритма поиска глобального оптимума целевой функции на основе метода эволюций тасуемых групп (Shuffled Complex Evolution method, Университет Аризоны, – SCE-UA) [19]. В качестве целевой функции использовалось среднеквадратическое отклонение рядов наблюдаемого и рассчитанного суточного стока. При этом поиск минимума среднеквадратического отклонения проводился в области рассчитанных гидрографов стока, для которых отклонение их среднего значения от среднего значения измеренного стока не превышало 5%.

Оценка качества воспроизведения моделью SWAP наблюдаемых значений суточного стока проводилась с использованием традиционно применяющихся в гидрологии (а также использованных авторами [8, 10, 11, 22, 23]) критериев: систематической ошибки *Bias*, равной разности между рассчитанными и измеренными средними значениями суточного стока, коэффициента корреляции между рассчитанными и измеренными величинами стока *Corr* и эффективности расчетов *Eff* по Нэшу–Сатклиффу [29].

При разработке методик прогнозов стока довольно распространенной является следующая шкала оценки их точности [1]: ”хорошая“ точность при  $Eff \geq 0.75$  и ”удовлетворительная“ – при  $0.36 < Eff < 0.75$ . В основу оценки качества моделирования стока с использованием  $|Bias|$  могут быть положены соображения о том, что систематическая ошибка суточных, месячных и годовых значений измеренного речного стока в среднем  $\geq 5\%$  [35] (для периодов половодья ошибка измерения стока может быть существенно выше). Поэтому было принято, что в случаях, когда  $|Bias| \leq 5\%$ , качество расчетов стока можно признать хорошим.

Результаты сопоставления рассчитанных и измеренных гидрографов суточного стока Северной Двины в районе стоковой ст. Усть-Пинега за 1967–1998 гг., полученные при оптимальных значениях параметров подстилающей поверхности, показали, что систематическая ошибка расчета составила 3%, эффективность расчета – 0.83, коэффициент корреляции – 0.91, т.е. что модельное воспроизведение стока довольно хорошее. Длительный опыт работы с моделью SWAP в связи с ее применением в ряде международных проектов показывает, что если при надежном информационном обеспечении одна из характеристик водного или теплового режима воспроизводится моделью с довольно высокой точностью, то и остальные режимные характеристики моделиру-

ются вполне адекватно [6], что свидетельствует о хорошем качестве самой модели. Данное заключение делает возможным применение модели SWAP (с оптимизированными значениями параметров подстилающей поверхности) для получения сценарных прогнозов динамики изменения составляющих водного баланса Северной Двины в последующие десятилетия XXI в. Основной проблемой при этом становится подготовка 3-часовых метеорологических данных для различных сценариев изменения климата.

*Подготовка прогностических сценариев  
метеорологического обеспечения модели  
на период до 2063 г.*

В работе были выбраны четыре альтернативных сценария Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), относящиеся к семейству сценариев Special Report on Emissions Scenarios (SRES): A1, A2, B1, B2 [30]. Эти сценарии использовались при разработке третьего оценочного доклада МГЭИК на Седьмой конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Марракеш, Марокко, 2001 г.), они включали в себя широкий спектр предположений о будущей интенсивности выбросов парниковых газов в зависимости от проведения человечеством той или иной специальной политики в области воздействия на климат. Предположения, принятые в указанных сценариях, взяты в основном из опубликованных прогнозов ведущих международных организаций или из анализа экспертов МГЭИК. Большинство из них были предметом широкого научного обзора. Вкратце опишем использованные сценарии.

Сценарий A1 описывает будущий мир с очень быстрым экономическим ростом, с низким приростом населения и быстрым внедрением новых и более эффективных технологий. основополагающие темы: сближение разных регионов, активизация культурных и социальных взаимосвязей, а также существенное сокращение региональных различий в доходе на душу населения.

Сценарий A2 описывает весьма неоднородный мир. основополагающая тема – самообеспечение и сохранение местной самобытности. Рождаемость по регионам снижается очень медленно, что приводит к высоким темпам роста населения. Экономическое развитие: регионально ориентированный экономический рост по показателям на душу населения, технологические изменения более фрагментарны и происходят медленнее, чем в других сценариях.

Сценарий В1 описывает конвергентный мир с тем же ростом населения, что и сценарий А1, но при быстрых изменениях в экономических структурах в направлении сервисной и информационной экономики с уменьшением материальной интенсивности и внедрением чистых и ресурсосберегающих технологий. Акцент сделан на глобальные решения проблемы экономической, социальной и экологической устойчивости, включая достижение большей социальной справедливости, но без дополнительных инициатив по изменению климата.

Сценарий В2 описывает мир, в котором акцент сделан на локальные решения проблемы экономической, социальной и экологической устойчивости. Это мир с умеренным ростом населения, промежуточными уровнями экономического развития и менее быстрыми и более разнообразными технологическими изменениями по сравнению со сценариями В1 и А1.

Отметим, что в данной работе выбранные сценарии служат для иллюстрации разработанной методики, вместо них могут быть использованы любые другие разработанные сценарии изменения климата.

Для получения данных по динамике метеорологических характеристик в XXI в., служащих исходной информацией для расчетов по модели SWAP, был использован компьютерный программный комплекс Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change/A Global and Regional Climate Scenario Generator (MAGICC/SCENGEN) [28]. По существу, этот комплекс – генератор климатических сценариев, предназначенный для оценки уязвимости или адаптации различных экосистем или биомов планеты к климатическим изменениям.

Выходными характеристиками MAGICC являются глобальные прогнозы динамики годовых величин эмиссии углерода в атмосферу, концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере, изменения составляющих приходящей радиации в соответствии с приростом в атмосфере каждой компоненты парниковых газов и аэрозолей, изменения приземной температуры воздуха и уровня океана с 1990 по 2100 г. На рис. 2 показаны полученные на основе применения MAGICC результаты оценки динамики ряда указанных глобальных характеристик, соответствующие сценарию А1.

Следующий этап решения задачи прогнозирования динамики метеорологических характеристик в XXI в. заключается в переходе от глобальных оценок их изменения к региональным. Возможны различные варианты реализации этого

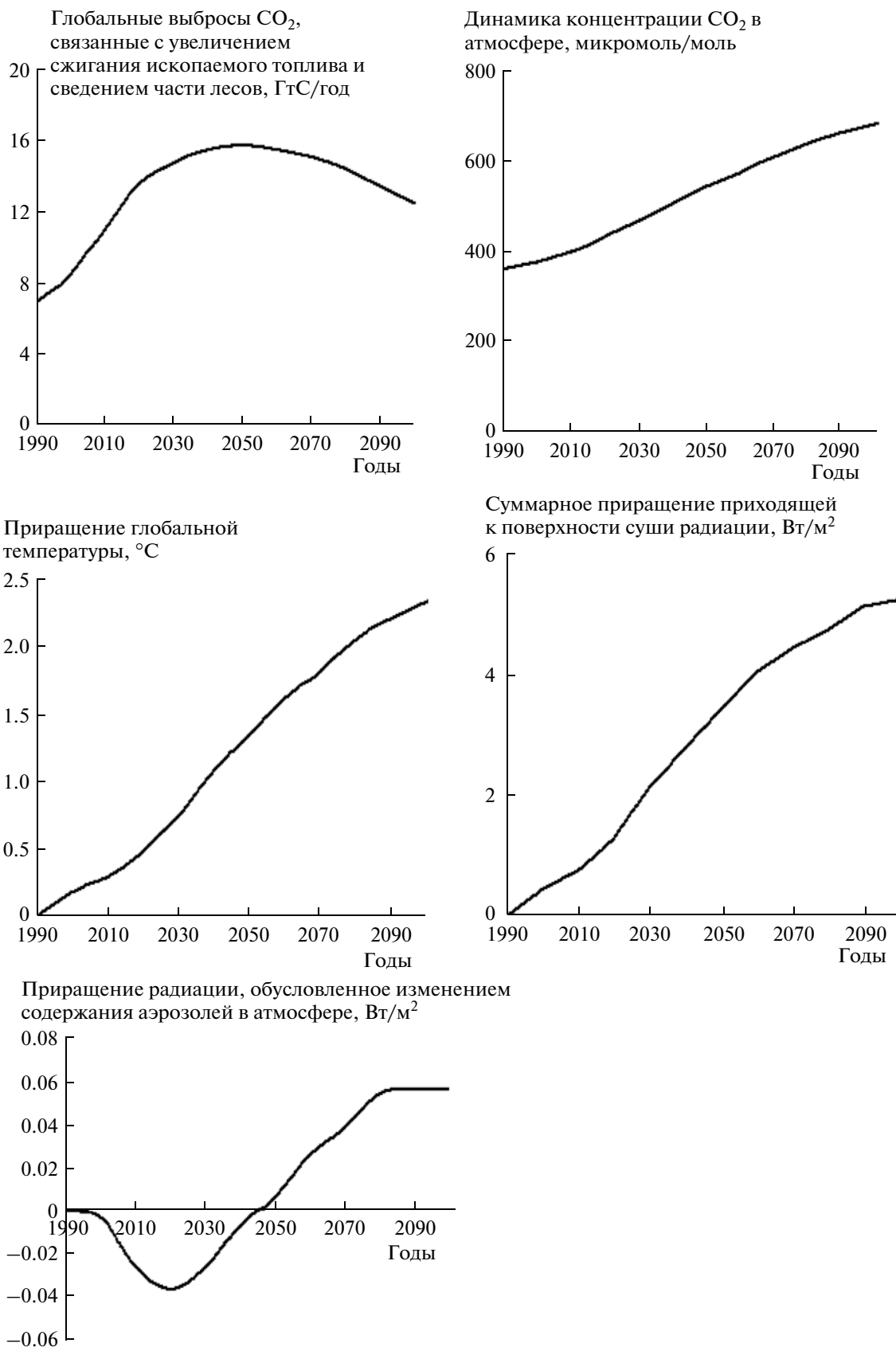
этапа. В настоящей работе был применен вариант подключения вышеуказанного программного комплекса SCENGEN, использующего, во-первых, выходные характеристики комплекса MAGICC, во-вторых – результаты расчетов распределения по Земному шару основных метеорологических элементов с помощью моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с высоким пространственным разрешением. В результате работы комплекса SCENGEN для бассейна р. Северная Двина были получены прогнозы приращений на 2000–2100 гг. (по отношению к 1990 г.) среднемесячных значений температуры и влажности воздуха, осадков, облачности и скорости ветра (т.е. почти всех метеорологических характеристик, необходимых для проведения расчетов по SWAP-модели) для сценариев SRES. Отметим, что изменения указанных метеорологических характеристик имеют достаточно выраженный сезонный ход.

При расчете по программе SCENGEN использовался приведенный в таблице ансамбль МОЦА, поскольку, как отмечается в [14, 15], расчеты современного климата и сезонные климатические прогнозы оказываются более успешными, если они усредняются по ансамблю независимых моделей (хотя имеется и противоположное мнение).

Далее, поскольку расчеты по модели SWAP проводились с 3-часовым расчетным шагом (в целях повышения точности расчета посредством учета суточного хода рассматриваемых процессов), необходимо было перейти от среднемесячных значений метеорологических характеристик к их значениям с более высоким – 3-часовым разрешением. Методика такого перехода была разработана и впервые апробирована в [5]. В рамках данной методики были получены расчетные формулы, аппроксимирующие временной годовой ход прогнозируемых приращений метеозлементов:

$$\Delta y(n, i) = \Delta T_{gl}(n) F_y(i), \quad (1)$$

где  $\Delta y(n, i)$  – изменение метеорологической характеристики  $y$  (в абсолютных величинах для температуры воздуха и в относительных – для осадков, скорости ветра, влажности воздуха и облачности) для  $i$ -го 3-часового срока  $n$ -го года (отсчитываемого от 1990 г.),  $\Delta T_{gl}$  – изменение глобальной среднегодовой температуры для  $n$ -го года (по сравнению с температурой 1990 г.),  $F_y(i)$  – аппроксимирующий полином, коэффициенты которого были получены по результатам оценки с помощью SCENGEN нормированных на  $\Delta T_{gl}$  среднемесячных значений изменений соответствующей характеристики. На рис. 3 приведены примеры динамики рассчитанных по уравнению



**Рис. 2.** Пример оценки изменений ряда глобальных характеристик Земли, связанных с изменением интенсивности выбросов парниковых газов и аэрозолей в атмосферу планеты в соответствии со сценарием социально-экономического развития человеческой цивилизации IPCC SRES A1.

Модели общей циркуляции атмосферы высокого разрешения, использованные в работе модельного комплекса SCENGEN

Модель	Расшифровка аббревиатуры, страна
HadCM2	Hadley Centre Unified Model 2 Transient Ensemble-mean (UK)
UKTR	UK Met Office/Hadley Centre Transient (UK)
CSIRO-TR	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Transient (Australia)
ECHAM4	European Centre/Gamburg Model 4 Transient (Germany)
UKHI-EQ	UK Met. Office High Resolution (UK)
CSIRO2-EQ	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Mark 2 (Australia)
ECHAM3	European Centre/Gamburg Model 3 Transient (Germany)
UIUC-EQ	University of Illinois at Urbana Champaign (USA)
ECHAM1	European Centre/Gamburg Model 1 Transient (Germany)
CSIRO1-EQ	Commonwealth Scientific and Ind. Research Org., Mark 1 (Australia)
CCC-EQ	Canadian Climate Centre (Canada)
GFDL-TR	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Transient (USA)
BMRC-EQ	Bureau of Meteorology Research Centre (Australia)
CGCM1-TR	Canadian Climate Centre for Modelling and Analysis 1 Transient (Canada)
NCAR-DOE	National Centre for Atmospheric Research (DoE) Transient (USA)
CCSR/NIES	Centre for Climate Research Studies/NIES (Japan)



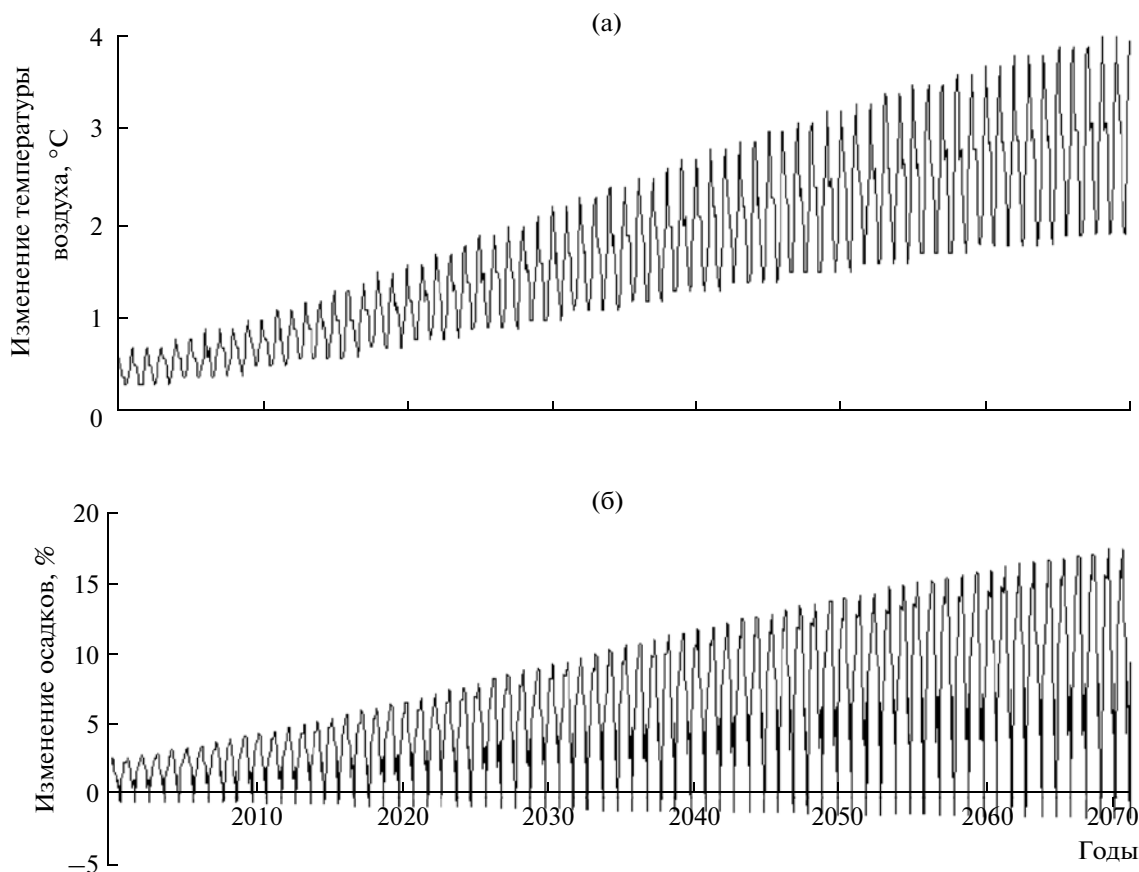


Рис. 3. Изменения (по сравнению с 1990 г.) приземной температуры воздуха и осадков в бассейне р. Северная Двина с 2000 по 2070 г. в соответствии с климатическим сценарием МГЭИК SRES A1.

(1) изменений (по сравнению с 1990 г.) приземной температуры воздуха и осадков в бассейне Северной Двины за период с 2000 по 2070 г. для сценария A1.

Полученные формулы позволяют проводить оценку долговременных рядов приращений метеорологических характеристик и могут быть использованы для расчета непосредственно самих прогнозируемых значений этих характеристик для всего XXI в. по глобальным прогнозам IPCC SRES при наличии для рассматриваемого района рядов метеорологической информации (с 3-часовым шагом) за достаточно продолжительный предпрогнозный период XX в. (назовем его T0-период). В качестве такового был взят период 1968–1999 гг., поскольку для него у авторов имелась вся необходимая информация по метеорологическим элементам в бассейне Северной Двины.

Для каждого метеоэлемента  $u$  из ряда колебаний его значений для T0-периода вычислялась (путем удаления линейного временного тренда соответствующего элемента, рассчитанного для T0-периода также с использованием программы MAGICC/SCENGEN) реализация стационарной

составляющей временного хода метеоэлемента, отражающая его внутригодовую, синоптическую и внутрисуточную изменчивость. Далее стационарная составляющая этого метеоэлемента, для каждой расчетной ячейки дважды последовательно “перенесенная” на прогнозируемые годы XXI в. (с 2000 до 2031 г. и с 2032 до 2063 г.), комбинировалась с рассчитанным по уравнению (1) долговременным трендом этого элемента в XXI в. Комбинирование заключалось либо в прибавлении (на каждом временном шаге  $i$ ) к значениям стационарной составляющей  $u_i$  абсолютных значений приращений  $\Delta u(n, i)$  (для температуры воздуха), либо в умножении  $u_i$  на величину  $[1 + \Delta u(n, i)]$  (для осадков, скорости ветра, влажности воздуха и облачности). Это позволило в итоге для каждой расчетной ячейки получить с 3-часовым шагом одну из возможных реализаций рядов прогнозируемых метеоэлементов для 2000–2063 гг. для соответствующего климатического сценария.

Относительные изменения приходящей к подстилающей поверхности длинноволновой радиации  $R_{LW}$  рассчитывались по уравнению Кирхгофа [13] с учетом как современных значений температуры воздуха в рассматриваемом районе, так и ее

возможного изменения в XXI в. Изменения приходящей коротковолновой радиации  $R_{SW}$  оценивались с использованием глобальных данных о ее уменьшении (обусловленном увеличением концентрации аэрозолей в тропосфере (рис. 2)), скорректированных пропорционально отношению среднегодового локального значения  $R_{SW}$  в рассматриваемом районе к среднегодовому глобальному значению  $R_{SW}$ . Следует отметить, что точность оценки влияния (как прямого, так и косвенного, связанного с изменением облачности и размеров капель воды в облаках) концентрации антропогенных аэрозолей в тропосфере на приходящую радиацию сравнительно невысока по сравнению с точностью оценки влияния на климатическую систему других факторов [25]. Однако, поскольку антропогенные аэрозоли вносят меньший вклад в изменение характеристик системы, чем другие факторы, при решении поставленной задачи даже грубые оценки влияния аэрозолей на приходящую радиацию были все же использованы.

Полученные указанным выше способом временные ряды метеорологических характеристик служат исходной информацией для задания верхних граничных условий при моделировании с помощью SWAP сценарной динамики составляющих водного баланса бассейна р. Северная Двина в 2000–2063 гг.

Прежде чем перейти к расчету сценарных прогнозов изменения элементов водного баланса исследуемого объекта, полезно рассмотреть вопрос о зависимости устьичной проводимости  $g_c$  и потенциальной транспирации  $EP$  растительного покрова от концентрации углекислого газа в окружающем воздухе  $c_a$ . Дело в том, что в версии SWAP, рассчитывающей составляющие водного баланса в XX в., эта зависимость не учитывалась в связи с малым изменением концентрации  $CO_2$  в атмосфере. Однако при значительных изменениях концентрации  $CO_2$ , которые прогнозируются в XXI в., без включения в модель указанной зависимости не представляется возможным корректно моделировать динамику водного баланса экосистемы.

Анализ экспериментальных данных для ряда культур, приведенный, например, в [26, 32], показывает, что в диапазоне  $c_a = 200\text{--}900$  мкмоль моль<sup>-1</sup> зависимость  $g_c(c_a)$  вполне может быть аппроксимирована экспонентой

$$g_c/g_{c0} = \exp[-\mu_i(c_a - c_{a0})], \quad (2)$$

где  $g_{c0}$  – устьичная проводимость, м с<sup>-1</sup>, фитозлементов того или иного вида растительности, соответствующая современному содержанию  $CO_2$  в атмосфере  $c_{a0}$ , принятому  $\approx 350$  мкмоль моль<sup>-1</sup>;  $\mu_i$  – эмпирический параметр, зависящий от типа растительности (задаваемого индексом  $i$ ) и определяющий темп изменения  $g_c$  с изменением  $c_a$ . Приведенный в [20] обзор исследований для

23 видов древесной растительности показал, что удвоение концентрации  $CO_2$  в атмосфере уменьшает устьичную проводимость в среднем на 23%, однако при этом для хвойных (*Pinus radiata*, *Pinus taeda*, *Picea abies*) такое уменьшение относительно невелико и составляет в среднем только  $10 \pm 2\%$ . Поскольку в бассейне Северной Двины доминирующим видом растительности являются хвойные леса, именно последнее значение (10%) и было принято в данной работе при оценке  $\mu_i$  для хвойных деревьев.

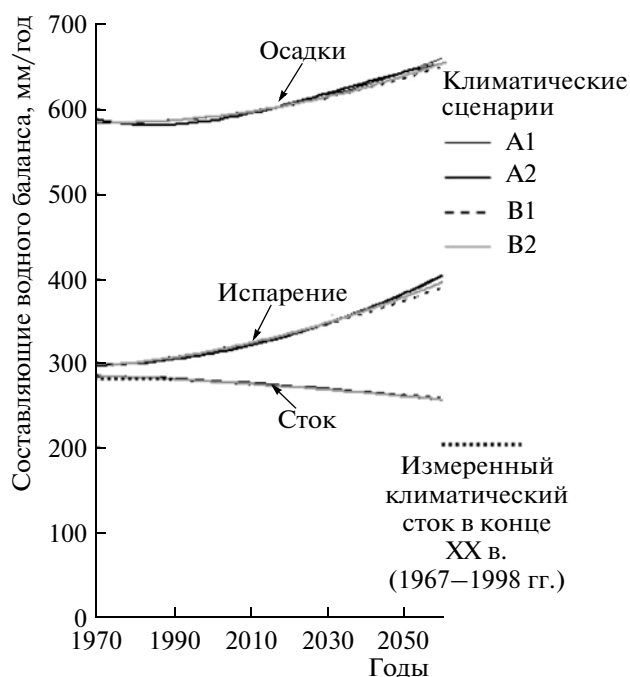
Изменение устьичной проводимости с изменением содержания  $CO_2$  в атмосфере влияет не только на скорость фотосинтеза, но и на транспирацию растительного покрова, поэтому необходимо было ввести в модель учет и этого фактора (предыдущие версии модели SWAP были ориентированы на современное содержание  $CO_2$ ). Учет указанного фактора был основан на использовании полупырической теории транспирации, предложенной А.И. Будаговским [2, 3, 12]. Это дало возможность получить следующее выражение для зависимости потенциальной транспирации  $EP_i$   $i$ -го вида растительности от  $c_a$  (при прочих равных метеорологических условиях):

$$EP_i = 2.25 EP_{0i} / \{2.0 + 0.25 \exp \mu_i [(c_a - c_{a0})]\}, \quad (3)$$

где  $EP_{0i}$  – потенциальная транспирация  $i$ -го вида растительности при содержании  $CO_2$  в атмосфере в конце XX-го в.

После введения в блок расчета транспирации уравнения (3) были проведены модельные расчеты элементов водного баланса в бассейне Северной Двины с 1967 по 2063 г. для всех четырех выбранных климатических сценариев SRES.

Отметим, что при проведении расчетов по сценарным прогнозам параметры подстилающей поверхности не менялись по сравнению с современными. Авторы исходили из того, что в данном преимущественно лесном и холодном регионе значительные агротехнические воздействия вряд ли будут иметь место и значения параметров почвы останутся прежними. Что касается растительности, то за указанный период ее морфологические характеристики также вряд ли могут существенно измениться, даже при увеличении стока углерода в этом районе. Дело в том, что, как показано в [5], при более или менее стационарном состоянии лесных экосистем (в районе бассейна Северной Двины хвойные леса можно считать таковыми) депонирование углерода происходит в основном в почве, в живой биомассе его накопление невелико, что практически не меняет модельных параметров растительного покрова. Значительных сукцессий за выбранный в работе временной интервал также ожидать не приходится. Поэтому и параметры вегетирующего покрова в районе бассейна Северной Двины для периода сценарных прогнозных расчетов были приняты такими же, как и в современный период.

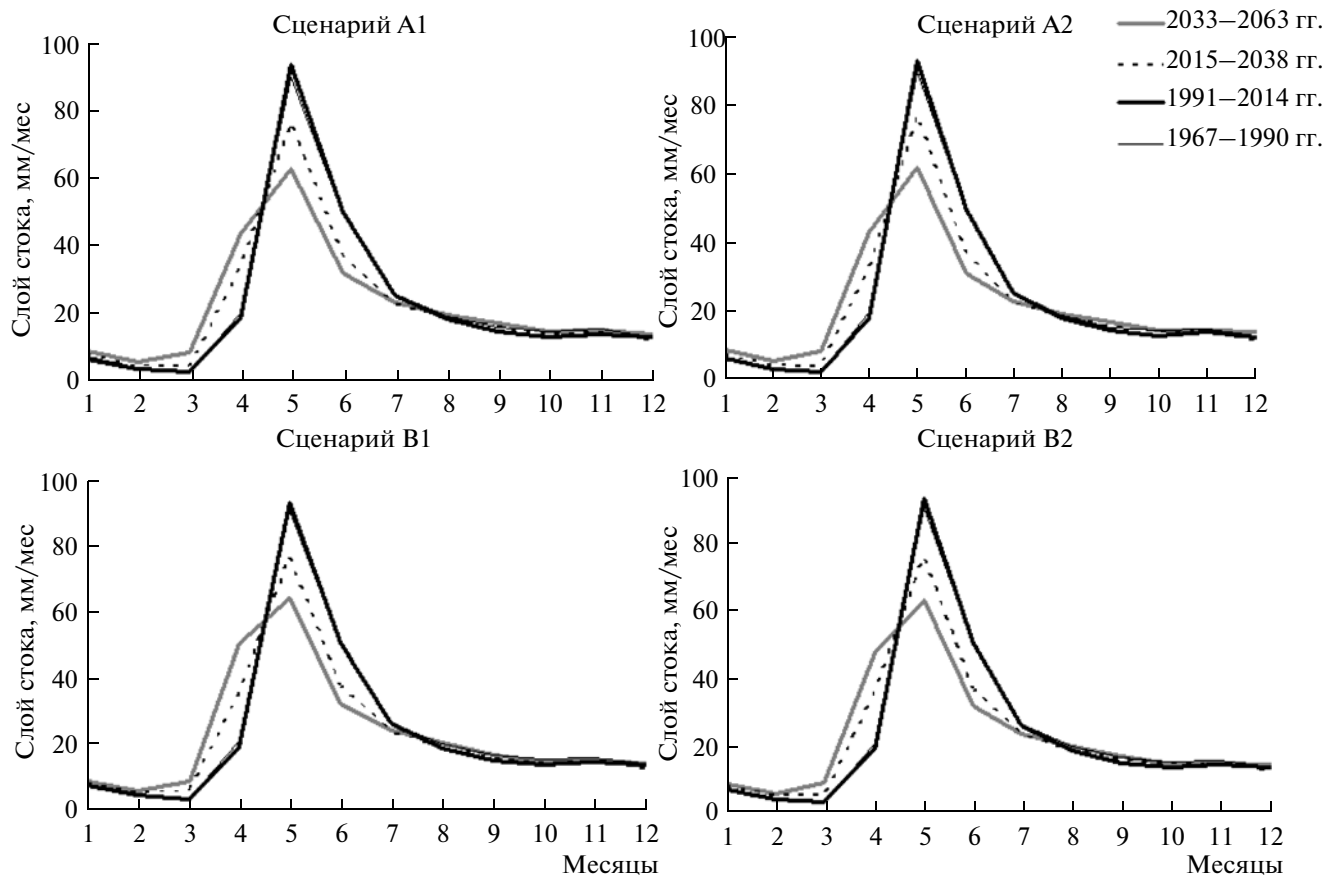


**Рис. 4.** Изменения климатических значений осадков, испарения и речного стока в бассейне р. Северная Двина для первых двух третей XXI в. при четырех сценариях глобальных изменений климата МГЭИК SRES.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА БАСЕЙНА СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ ПО ПРОГНОСТИЧЕСКИМ СЦЕНАРИЯМ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА SRES МГЭИК

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 4–7. На рис. 4 показана климатическая динамика составляющих водного баланса бассейна Северной Двины с 1967 по 2063 г. При климатическом осреднении было выбрано четыре временных периода: 1967–1990, 1991–2014, 2015–2038 и 2039–2063 гг., по которым проводилось осреднение рассчитанных составляющих водного баланса.

Отметим два следующих обстоятельства. Во-первых, по проведенным оценкам, влияние динамики антропогенных аэрозолей на динамику составляющих водного баланса вплоть до середины XXI в. оказалось крайне незначительным (первые доли процента, что находится в пределах ошибок расчета). Во-вторых, то же можно сказать и о незначительном влиянии изменения устьичного сопротивления, вызванного изменением концен-



**Рис. 5.** Изменения климатических гидрографов слоя стока р. Северная Двина для четырех сценариев изменения климата МГЭИК SRES.

трации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Связано это во многом с тем, что доминирующим видом растительности в данном районе являются хвойные леса, для которых увеличение устьичного сопротивления с ростом концентрации углекислого газа, как было отмечено ранее, весьма мало. Кроме того, при расчете транспирации устьичное сопротивление составляет только часть общего сопротивления переносу водяного пара по траектории: мезофилл листа (или хвойной иглы) – устьице – межлистное пространство – атмосфера (остальные два сопротивления не зависят от содержания  $\text{CO}_2$  в атмосфере). Далее, сама транспирация составляет только часть общего суммарного испарения, в котором присутствуют также испарение перехваченных осадков, испарение с почвы, испарение со снега (лежащего как на деревьях, так и под пологом леса). На указанные компоненты изменение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере также не влияет. Все это приводит к тому, что учет влияния изменения устьичного сопротивления вследствие увеличения  $\text{CO}_2$  в атмосфере на составляющие водного баланса бассейна Северной Двины в выбранный период находится также в пределах ошибок расчета.

На рис. 4 представлены данные по динамике осадков, испарения и стока бассейна Северной Двины для всех четырех выбранных климатических сценариев SRES. Как видно из представленных результатов, при реализации всех четырех сценариев в бассейне увеличиваются осадки и суммарное испарение, уменьшается речной сток. Причем результаты мало отличаются для разных сценариев изменения климата. Наибольшие изменения в основном происходят при реализации сценариев A1 и A2, наименьшие – при B1 и B2. Так, осадки к началу 2060-х гг. увеличились по сравнению с концом 1960-х гг. для сценариев A1 и A2 на 60 мм/год, а для B1 и B2 – соответственно на 52 и 55 мм/год. Суммарное испарение с бассейна за указанный период возросло на 84–85 мм/год для сценариев A1 и A2 и на 75–79 мм/год для сценариев B1 и B2. Речной сток, напротив, уменьшился на 22–24 мм для всех сценариев.

Довольно заметно изменились и формы внутригодовых гидрографов стока. На рис. 5 приведены климатические годовые гидрографы для всех четырех сценариев изменения климата за разные периоды осреднения. Видно, что с течением времени пики весеннего половодья уменьшаются, начало стока весеннего половодья немного сдвигается на более ранние сроки, форма гидрографа “выполаживается”. В то же время, увеличивается интенсивность стока зимней межени. Все указан-

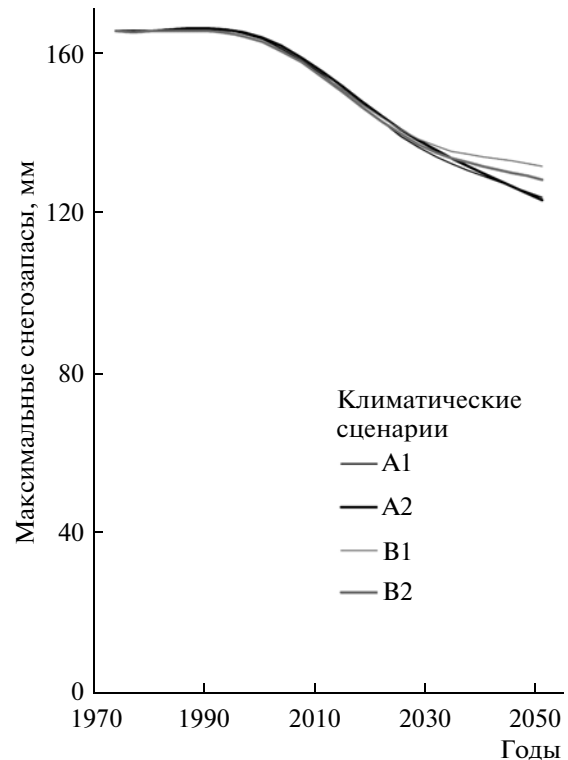
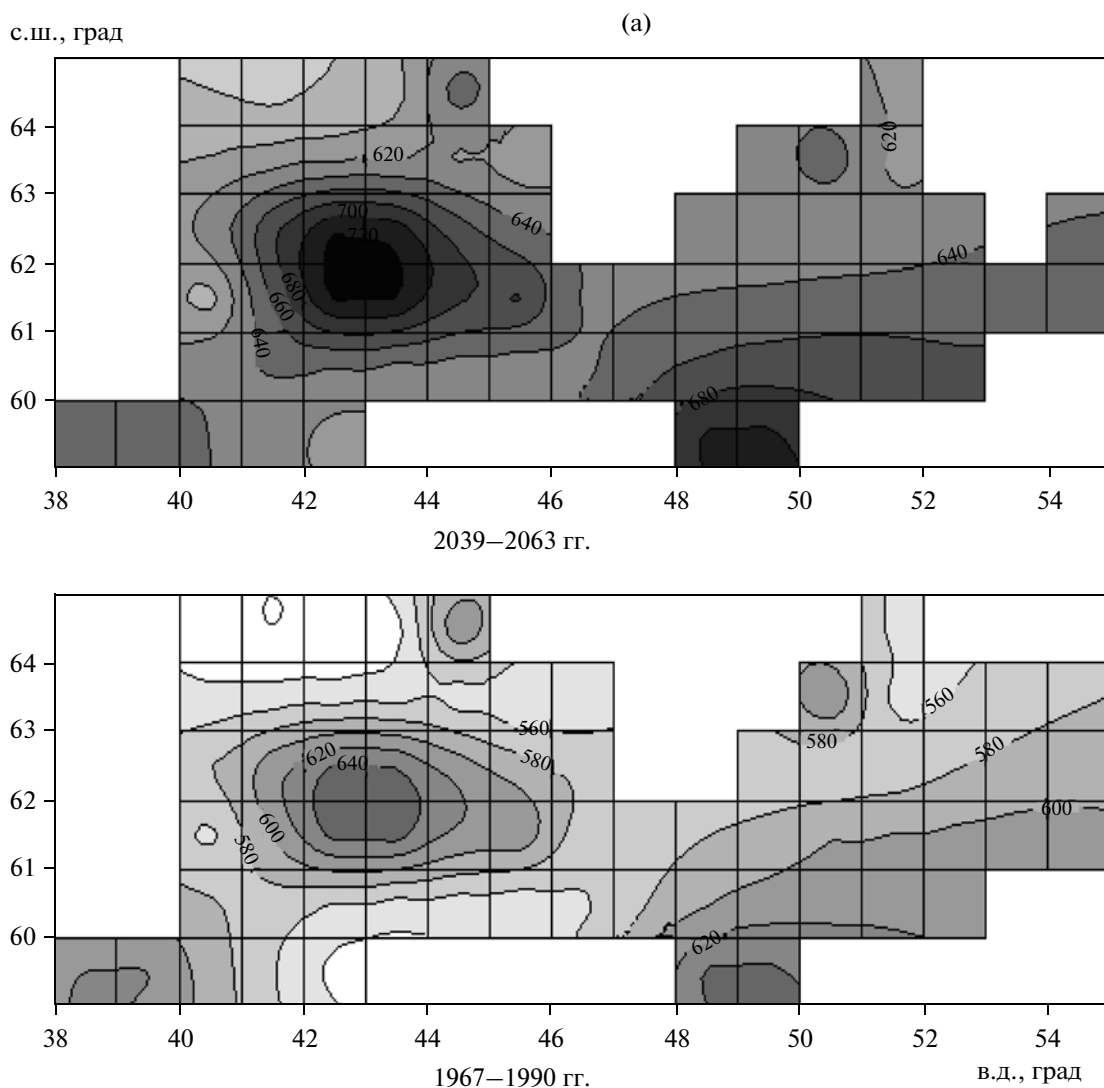


Рис. 6. Изменение максимальных (весенних) снеготазов в бассейне р. Северная Двина для первых двух третей XXI в. при четырех сценариях изменения климата МГЭИК SRES.

ные явления имеют вполне логичное физическое объяснение. Увеличение зимней межени связано с увеличением числа и интенсивности зимних оттепелей, обусловленных ростом температуры. Рост температуры, связанный с увеличением интенсивности поступающей радиации, приводит и к более раннему началу весеннего снеготаяния. Что же касается снижения пиков (и самих объемов) весеннего половодья, то эти явления обусловлены, в первую очередь, более ранним началом весеннего снеготаяния и уменьшением накапливающихся за зиму снеготазов. На рис. 6 показано изменение максимальных весенних снеготазов до 2063 г. для выбранных климатических сценариев. Их уменьшение к началу 2060-х гг. по сравнению с концом 1960-х гг. – в диапазоне 35–45 мм. Причина этого явления – увеличившееся испарение со снега и участвовавшие зимние оттепели.

На рис. 7 приведено пространственное распределение значений климатических составляющих водного баланса (осредненных за 1967–1990 и 2039–2063 гг. соответственно) для климатического сценария SRES A1. На нем показано, как меня-



**Рис. 7.** Пример пространственного распределения по бассейну р. Северная Двина климатических годовых значений осадков (а), испарения (б) и стока (в), мм/год, за 1967–1990 и 2039–2063 гг. в соответствии с реализацией климатического сценария МГЭИК SRES A1.

ется со временем пространственное распределение по бассейну Северной Двины рассчитанных составляющих водного баланса: климатических осадков, суммарного испарения и стока. Представленная на рис. 7 динамика распределений составляющих водного баланса, во-первых, подтверждает предыдущие выводы работы, во-вторых, дает возможность оценить локальные (в пределах бассейна Северной Двины) интенсивности изменения соответствующей характеристики водного баланса.

В частности, на рис. 7 четко видны пространственные различия в распределении составляю-

щих водного баланса. Так, в районе р. Ваги и несколько южнее, а также в юго-восточной части бассейна, где имеются небольшие возвышенности, осадки и их изменения существенно выше, чем в других местах бассейна. То же касается и испарения. В этих районах оно увеличивается примерно на 80–100 мм/год. Что касается местного стока, то его наибольшие значения, как и наибольшие значения его уменьшения к 2039–2063 гг. (примерно на 40 мм/год), приходятся на районы истока р. Сухоны (юго-западная часть бассейна) и на небольшую область в юго-восточной части бассейна.

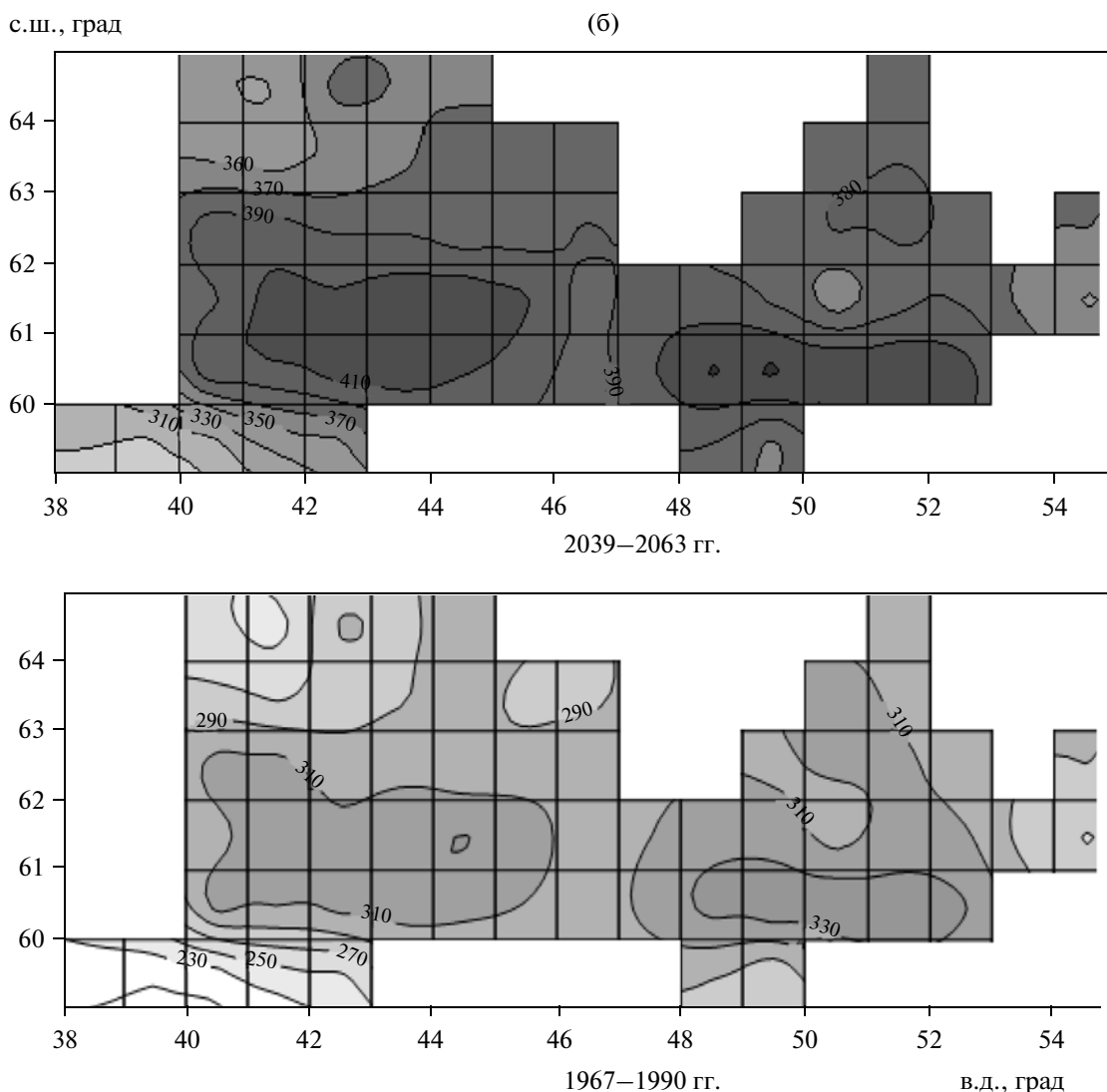


Рис. 7. Продолжение.

## ВЫВОДЫ

Разработана методика сценарного прогнозирования изменения составляющих водного баланса бассейнов северных рек, связанных с возможными изменениями климата. Методика основана на использовании модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP и генератора климатических сценариев MAGICC/SCENGEN.

Для четырех климатических сценариев МГЭИК SRES: A1, A2, B1, B2, соответствующих заданным сценариям экономического, технологического, политического и демографического развития человеческой цивилизации, получены прогнозные варианты 3-часовой динамики метеорологических элементов в бассейне р. Северная Двина до 2063 г.

На основе полученных сценариев динамики метеорологических элементов рассчитана динамика составляющих водного баланса бассейна Северной Двины до 2063 г. Значения составляющих усреднены по 24–25 годам, чтобы проиллюстрировать изменения указанных величин в климатическом масштабе. Показано, что при реализации всех четырех климатических сценариев в бассейне увеличиваются осадки и суммарное испарение, в то время как речной сток уменьшается. Количественные различия между полученными результатами для использованных климатических сценариев невелики.

Построены карты пространственного распределения по бассейну Северной Двины значений составляющих водного баланса (осадков, суммарного испарения и стока) для различных кли-

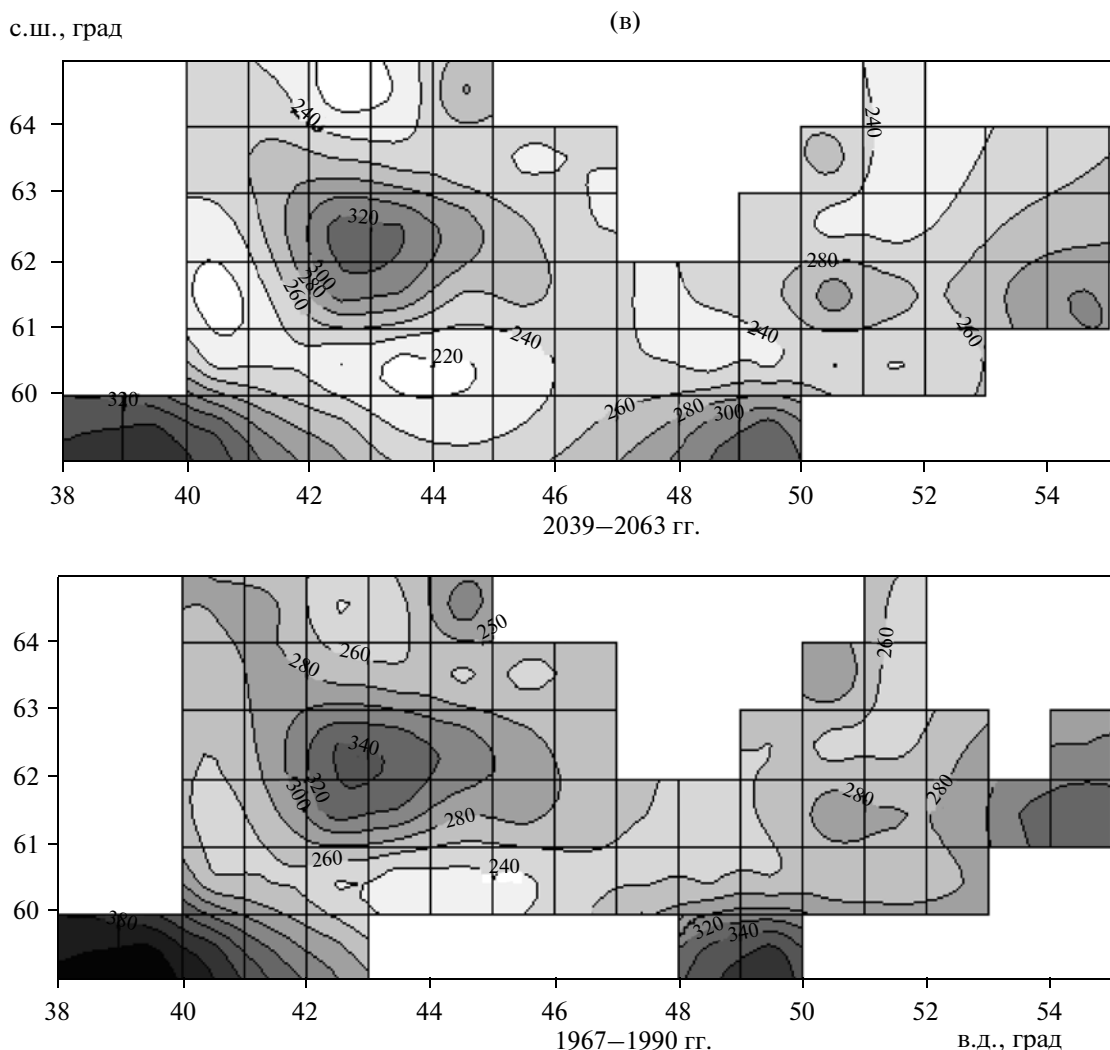


Рис. 7. Окончание.

матических периодов и для использованных климатических сценариев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апполов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 366 с.
2. *Будаговский А.И.* Испарение почвенных вод // Физика почвенных вод. М.: Наука, 1981. С. 13–95.
3. *Будаговский А.И.* Полуэмпирическая теория транспирации и водного режима растительного покрова // Вод. ресурсы. 1989. № 2. С. 5–17.
4. *Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л. и др.* Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 89–99.
5. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Методика оценки динамики водного и углеродного балансов экосистемы хвойного леса // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 81–92.
6. *Гусев Е.М., Насонова О.Н.* Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 327 с.
7. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.* Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 133–145.
8. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я.* Воспроизведение гидрографов стока р. Печоры на основе модели теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP // Вод. ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 186–198.
9. *Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э.* Моделирование составляющих теплового и водного балан-

- сов поверхности суши земного шара // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 664–676.
10. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э. Использование модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой для расчетов речного стока в высоких широтах // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 181–195.
  11. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э. Моделирование стока р. Северной Двины с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP и глобальных баз данных // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 439–453.
  12. Лозинская Е.А. Методика и результаты определения параметров модели суммарного испарения // Вод. ресурсы. 1988. № 4. С. 17–23.
  13. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 640 с.
  14. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А. и др. Возможные антропогенные изменения климата России в 21-м веке: оценки по ансамблю климатических моделей // Тез. докл. Всемирной конф. по изменению климата. М.: ИГКЭ, 2003. С. 51–52.
  15. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А. и др. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI-м веке: оценки по ансамблю климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 38–49.
  16. Пивоварова З.И. Радиационные характеристики климата СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 355 с.
  17. Шикломанов А.И. Влияние антропогенных изменений глобального климата на сток р. Енисей // Метеорология и гидрология. 1994. № 2. С. 84–93.
  18. Barry R.G., Serreze M.C. Atmospheric components of the arctic ocean freshwater balance and their interannual variability // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean / Ed. Lewis E.L. N.Y.: Springer, 2000. P. 45–56.
  19. Duan Q., Sorooshian S., Gupta V.K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models // Water Resour. Res. 1992. V. 28. № 4. P. 1015–1031.
  20. Field C.B., Jackson R.B., Mooney H.A. Stomatal responses to increased CO<sub>2</sub>: implications from the plant to the global scale // Plant, Cell and Environment. 1995. V. 18. P. 1214–1225.
  21. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. The simulation of heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP // J. Hydrol. 2003. V. 280. № 1–4. P. 162–191.
  22. Gusev Ye.M., Nasonova O.N. Parameter Optimization for Simulating Runoff from Highlatitude River Basins Using Land Surface Model and Global Data Sets // Stochastic Optimization – Seeing the Optimal for the Uncertain / Ed. Ioannis Dritsas. Rijeka, Croatia: In-Tech, 2011. P. 413–440.
  23. Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhoghan L.Ya. Modeling River Runoff in Northwestern Russia with the Use of Land Surface Model SWAP and Global Databases // Water Res. 2011. V. 38. № 5. P. 571–582.
  24. IPCC: Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A. et al. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 572 p.
  25. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. et al. Cambridge; N.Y.: Cambridge University Press, 2001. 881 p.
  26. Maherali H., Reid C.D., Polley H.W. et al. Stomatal acclimation over a subambient to elevated CO<sub>2</sub> gradient in a C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> grassland // Plant, Cell and Environment. 2002. V. 25. P. 557–566.
  27. Miller J.R., Russell G.L. The impact of global warming on river runoff // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. № D3. P. 2757–2764.
  28. Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change. Norwich: Climatic Research Unit, University of East Anglia; N.Y.: the National Communications Support Programme, UNDP/GEF, 2000. 52 p.
  29. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // J. Hydrol. 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.
  30. Nebojsa N., Alcamo J., Davis G. et al. IPCC Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 599 p.
  31. Oechel W.C., Hastings S.J., Vourlitis G. et al. Recent change of Arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to a source // Nature. 1993. № 361. P. 520–523.
  32. Polley H.W., Johnson H.B., Mayeux H.S. Leaf physiology, production, water use, and nitrogen dynamics of the grassland invader *Acacia smallii* at elevated CO<sub>2</sub> concentrations // Tree Physiology. 1997. V. 17. P. 89–96.
  33. Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lammers R.B. et al. The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean / Ed. Lewis E.L. N.Y.: Springer, 2000. P. 281–296.
  34. Shmakin A.B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // Global Plan. Change. 1998. V. 19. № 1–4. P. 49–62.
  35. WMO, 1994. Guide to hydrological practices. WMO-No. 168. Geneva: WMO, 1994. 738 p.
  36. Zhao M., Dirmeyer P. Production and Analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets // COLA Technical Report. Calverton: Center for Ocean–Land–Atmosphere Studies, 2003. № 159. 38 p.