
**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

УДК 556.048

**СЦЕНАРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА В ОБЬ-ИРТЫШСКОМ
БАССЕЙНЕ В СВЯЗИ С ВОЗМОЖНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА¹**

© 2019 г. Е. М. Гусев^{1,*}, О. Н. Насонова¹, Е. А. Шурхно¹, Л. Я. Джоган¹

¹*Институт водных проблем РАН*

Россия 119333 Москва

**e-mail: sowaso@yandex.ru; gusev@iwp.ru*

Поступила в редакцию 07.05.2016 г.

После доработки 16.06.2016 г.

Принята к публикации 29.09.2017 г.

Для четырех глобальных климатических сценариев семейства «Special Report on Emissions Scenarios» Межправительственной группы экспертов по изменению климата, соответствующих заданным сценариям экономического, технологического, политического и демографического развития человеческой цивилизации, получены прогностические варианты динамики метеорологических элементов в Обь-Иртышском бассейне в XXI в., на основе которых рассчитаны варианты возможного изменения составляющих водного баланса указанного речного бассейна до середины XXI в. Методика расчетов основана на использовании физико-математической модели тепло- и массообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP и генератора климатических сценариев MAGICC/SCENGEN. Проведено сопоставление изменения годового стока р. Оби, обусловленного возможными глобальными изменениями климата, с его естественной изменчивостью, вызванной погодным шумом.

Ключевые слова: составляющие водного баланса, сценарии изменения климата, взаимодействие подстилающей поверхности суши с атмосферой, физико-математическое моделирование, глобальные базы данных, Обь-Иртышский бассейн.

DOI: 10.31857/S0321-0596465463-473

ВВЕДЕНИЕ

Полярные регионы, как отмечается в [1], в значительной мере контролирующие гидрологические процессы и водные ресурсы северного полушария планеты, подвергнутся самым ранним и наиболее глубоким изменениям, вызванным возможным изменением климата. Особую озабоченность по поводу влияния меняющегося климата на водные ресурсы полярных регионов вызывает Арктика. Пан-Арктический бассейн характеризуется огромным разнообразием водных ресурсов, включая многие самые большие реки мира. При этом в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [15, 16] даны оценки прираще-

ния температуры в северном полушарии к концу XXI в. на 3–5°C, а приращения осадков – на 15%.

В связи с этим одна из проблем, требующих решения, – прогнозирование изменения составляющих водного баланса северных рек при возможных климатических изменениях в данном регионе. В предыдущих работах авторов рассмотрено сценарное прогнозирование для нескольких рек Российской части Арктического региона: Северной Двины, Оленька, Индигирки и Лены [3, 6, 7, 9]. В настоящей работе ставится задача оценить изменение составляющих водного баланса одной из пяти величайших рек земного шара, а также одной из крупнейших рек бассейна Северного Ледовитого океана и всей

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-05-00555 – раздел “Сравнение сценарного изменения климатического годового стока р. Оби с его естественной межгодовой изменчивостью, вызванной погодным шумом”) и РНФ (грант 16-17-10039 – разделы “Изменение пространственного распределения составляющих водного баланса Обь-Иртышского бассейна в связи с возможными изменениями климата”, “Сравнение сценарного изменения климатического годового стока р. Оби с его естественной межгодовой изменчивостью, вызванной погодным шумом”) и “Результаты сценарного прогнозирования изменений элементов водного баланса Обь-Иртышского бассейна”).

России — Оби (с ее крупнейшим притоком — р. Иртыш) до 2070 г. Физико-географическое описание Обь-Иртышского бассейна представлено в [11].

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

В настоящей работе поставленная задача решалась с помощью методики сценарного прогнозирования изменения составляющих водного баланса северных речных бассейнов в связи с возможным изменением климата, разработанной в [2, 3]. В основе методики — модель взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой Soil Water — Atmosphere — Plants (SWAP) [4, 5, 19], глобальные базы данных по характеристикам подстилающей поверхности суши и сценарные прогнозы изменения метеорологических элементов в районе рассматриваемых бассейнов в XXI в. Последние базируются на климатических сценариях, полученных с учетом изменения интенсивности выбросов парниковых газов и аэрозолей в атмосферу в соответствии с тем или иным сценарием социально-экономического развития человеческой цивилизации. Поскольку в указанных выше работах по оценке влияния климата на изменения водного баланса рек Северной Двины, Оленька, Индигирки и Лены применялись климатические сценарии МГЭИК семейства SRES (Special Report on Emissions Scenarios): A1, A2, B1, B2 [23], то и в данной работе с целью сопоставимости полученных для разных рек результатов решено было использовать те же сценарии (хотя существует и более современное семейство сценариев — RCP — Representative Concentration Pathway [22], предназначенное для того, чтобы в конечном итоге заменить SRES). Сценарии SRES использовались при разработке третьего оценочного доклада МГЭИК на Седьмой конференции сторон Рамочной конвенции ООН по изменению климата (Марракеш, Марокко, 7 ноября 2001 г.). Они включают в себя широкий спектр предположений о том, как интенсивность выброса парниковых газов будет меняться при наличии или отсутствии той или иной специальной политики, осуществляемой человечеством в области воздействия на климат.

Что касается модели SWAP, то ее основу составляет физико-математическое описание процессов тепло- и влагообмена в системе грунтовые воды — почва — растительный / снежный покров — приземный слой атмосферы, а также описание трансформации стока воды как в речной сети, так и в процессе ее движения по элементам поверхности речного бассейна. При этом речной бассейн схематизируется в виде совокупности ячеек, соединенных между собой каналами речной сети. В настоящей работе пространственное разрешение расчетных ячеек Обь-Иртышского бассейна в меридиональном и широтном направлениях составляло $1^\circ \times 1^\circ$ (рис. 1).

Необходимое для расчетов информационное обеспечение модели SWAP включает в себя заданные для каждой расчетной ячейки значения метеорологических элементов с временным разрешением не более суток (обычно 3 ч) (которые для исторического периода были взяты из данных наблюдений метеорологических станций, расположенных в Обь-Иртышском бассейне) и параметров подстилающей поверхности (почвы и растительного покрова, а также топографических характеристик). Методика подготовки указанного информационного обеспечения описана в [11].

Для повышения точности расчетов значения ряда основных модельных параметров (набор которых для водосборов северных рек определен и обоснован в [8]) были оптимизированы [11]. Большие размеры Обь-Иртышского бассейна потребовали в целях повышения точности оценки оптимальных параметров разделения бассейна на три части (рис. 1), для каждой из которых по данным об измеренном стоке в соответствующем замыкающем створе оптимизировалось 8 параметров [11]. При этом использовались суточные значения стока, измеренного на стокowych станциях Ханты-Мансийская (для первой части бассейна), Колпашево (для второй части) и Салехард (для третьей части бассейна) (рис. 1).

Калибровка модельных параметров проводилась на основе метода глобального поиска экстремума SCE-UA [17]. При этом ставилась задача достижения максимума целевой функции, в качестве которой использовалась эффективность расчета суточного стока по Нэшу и Сатклиффу [24] Eff при условии, что абсолютное значение систематической ошибки расчетов $|Bias| \leq 5\%$.

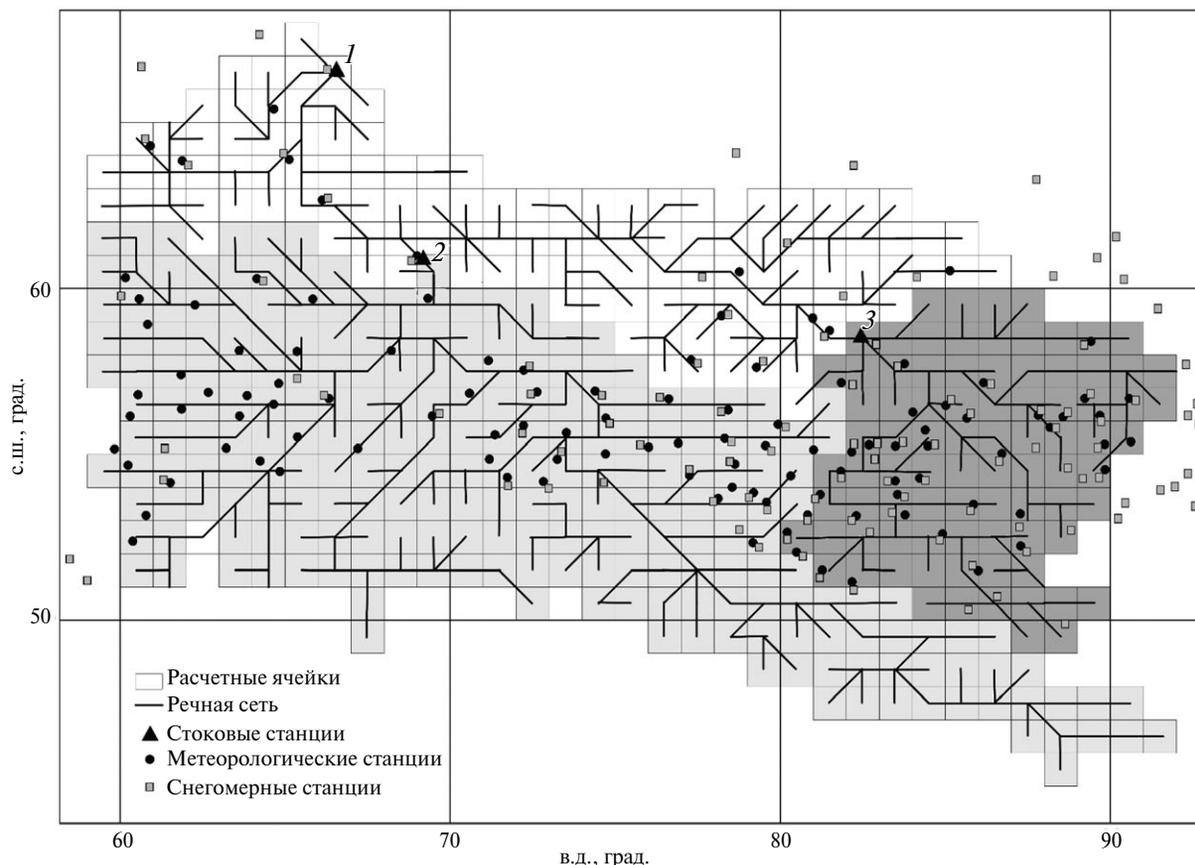


Рис. 1. Расчетная схема Обь-Иртышского бассейна и его речной сети [11]. Светло-серым цветом отмечен бассейн р. Иртыша (главного притока р. Оби) до стокосой станции Ханты-Мансийская (2), темно-серым – часть бассейна р. Оби до стокосой ст. Колпашево (3), не закрашена оставшаяся часть Обь-Иртышского бассейна до стокосой ст. Салехард (1).

При оценке качества воспроизведения моделью SWAP наблюдаемых значений суточного стока использовались традиционно применяемые в гидрологии статистические критерии: систематическая ошибка расчета *Bias*, равная разности между рассчитанными и измеренными средними значениями суточного стока, и эффективность расчетов *Eff*. Сопоставление измеренных и смоделированных (при оптимальных значениях параметров) суточных слоев стока для указанных выше створов рек Оби и Иртыша показало довольно хорошее их соответствие для проверочных периодов [11]. Это позволяет сделать вывод о возможности использования модели SWAP для решения поставленной в настоящей работе задачи – сценарного прогнозирования изменения составляющих водного баланса Обь-Иртышского бассейна в связи с возможным изменением климата. Кроме того, указанную возможность подтверждают оценки робастности модели SWAP для северных рек РФ (устойчивость воспроизведения измеренного речного стока для диапазона метеорологических

характеристик, отличного от того, при котором проводилась оптимизация модельных параметров) [6, 25, 26].

Так же как и для бассейнов рек, указанных выше, для Обь-Иртышского бассейна для каждого климатического сценария подготовлены прогностические ряды метеорологических элементов с 3-часовым шагом за период 2000–2070 гг. (методика подготовки таких рядов описана в [3]). При этом основой послужили результаты расчета климатических характеристик, полученные с использованием генератора климатических сценариев MAGICC/SCENGEN [21] и осредненные по ансамблю 16-ти моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) (таблица). Применение мультимодельного (ансамблевого) подхода обусловлено тем, что, как отмечается в [13], расчеты современного климата и сезонные климатические прогнозы оказываются более успешными, если они усредняются по ансамблю независимых моделей. Кроме того, для повышения точности расчетов прогнозируемых метеорологических полей Обь-Иртышский

Таблица. 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)

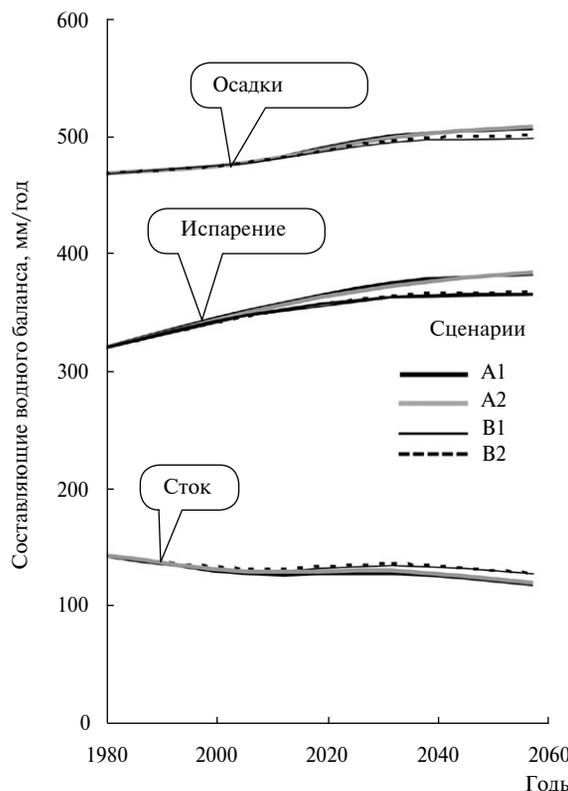
бассейн был разделен на 20 областей, для каждой из которых получены свои изменения климатических характеристик. Полученные в итоге трехчасовые прогностические метеорологические поля для всех четырех климатических сценариев, наряду с полями исторического периода, позволили провести расчеты характеристик водного режима Обь-Иртышского бассейна с использованием модели SWAP за период с 1967 по 2070 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ СЦЕНАРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ОБЬ-ИРТЫШСКОГО БАССЕЙНА

Рассмотрим полученные с использованием модели SWAP результаты сценарного прогнозирования изменений элементов водного баланса для Обь-Иртышского бассейна до середины 1960-х гг. Напомним, что при этом было использовано семейство климатических сценариев МГЭИК SRES. Поскольку работа направлена на получение характеристик климатического масштаба, результаты расчетов по модели SWAP и входные данные были осреднены по четырем временным интервалам (аналогичный подход применялся и в других работах авторов, например в [7]): 1967–1992, 1993–2018, 2019–2044, 2045–2070 гг.

На рис. 2 показана смоделированная динамика формирования составляющих водного баланса в Обь-Иртышском бассейне за исследуемый период в соответствии с различными сценариями изменения климата. Поскольку Обь-Иртышский бассейн очень велик, на рис. 3 представлена динамика формирования тех же характеристик для трех его подбассейнов. Отметим, что для всех сценариев семейства SRES

двумый период в соответствии с различными сценариями изменения климата. Поскольку Обь-Иртышский бассейн очень велик, на рис. 3 представлена динамика формирования тех же характеристик для трех его подбассейнов. Отметим, что для всех сценариев семейства SRES

**Рис. 2.** Климатическая эволюция составляющих водного баланса Обь-Иртышского бассейна до 2060 г.

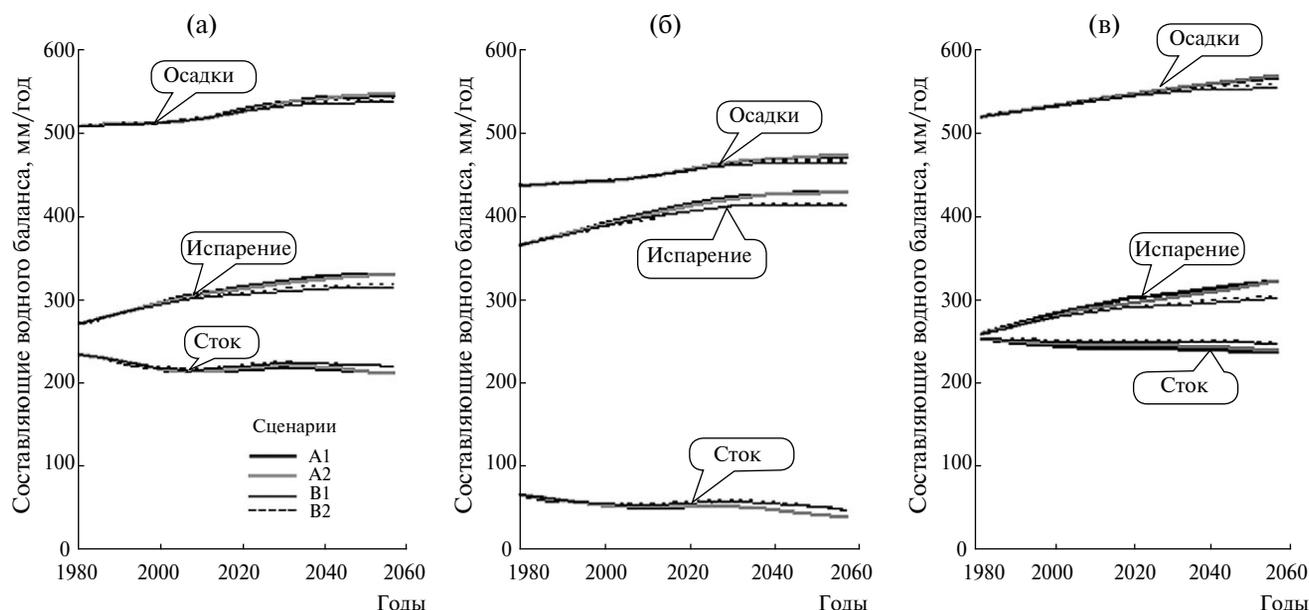


Рис. 3. Климатическая эволюция составляющих водного баланса верхней части бассейна р. Оби (до стоковой ст. Колпашево) (а), бассейна р. Иртыш (до стоковой ст. Ханты-Мансийская) (б) и нижней части бассейна р. Оби (до стоковой ст. Салехард) (в) для соответствующих климатических сценариев семейства SRES до 2060 г.

полученные климатические изменения составляющих водного баланса относительно близки как для всего Обь-Иртышского бассейна, так и для отдельных его частей (рис. 2, 3). Так, например, диапазон увеличения осадков в Обь-Иртышском бассейне к 1960-м гг. для разных сценариев составляет (по сравнению с периодом 1967–1992 гг.) 30–40 мм/год (6.5–8.2%), а испарения – 47–64 мм/год (15–20%), сток же уменьшится на 15–23 мм/год (11–17%).

Приведенные на рис. 3 траектории эволюции составляющих водного баланса показывают, что общие тенденции изменений в разных частях Обь-Иртышского бассейна практически одинаковые. Основные климатические факторы, определяющие изменения составляющих водного баланса, – изменение осадков и приходящей радиации. В данном случае на всей территории бассейна преобладает второй фактор. Существенное увеличение приходящей радиации (отражающееся в повышении приземной температуры воздуха), которая и в исторический период для большей части бассейна являлась фактором, определяющим испарение, приводит к тому, что приращение испарения превышает прирост осадков, что и вызывает сокращение речного стока.

Поскольку в целом Обь-Иртышский бассейн по природным условиям довольно неоднороден, абсолютные значения составляющих водного баланса в разных его частях иногда значительно различаются. В этом плане довольно сильно выделяется бассейн Иртыша, где осадки на 80–90 мм/год

меньше, чем в остальной части Обь-Иртышского бассейна (рис. 3). К тому же в связи с более южным расположением Иртыша температура воздуха, как и приходящая радиация, здесь в среднем выше, что приводит к более высоким значениям испарения (на ~100 мм/год по сравнению с испарением со всей территории Обь-Иртышского бассейна). В результате слой стока с бассейна Иртыша достаточно мал (~50 мм/год, что на 180–190 мм/год меньше слоя стока с остальной территории Обь-Иртышского бассейна).

На рис. 4 приведен пример изменения формы климатического гидрографа месячного стока р. Оби в районе близкой к устью реки стоковой

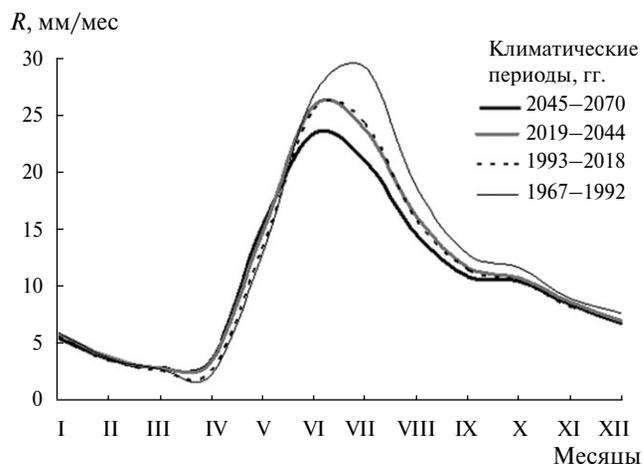


Рис. 4. Эволюция формы климатического годового гидрографа слоя стока R р. Оби в районе стоковой ст. Салехард до 2070 г. при реализации климатического сценария SRES A1.

ст. Салехард для климатического сценария SRES A1 (для остальных сценариев характер изменения климатических гидрографов практически такой же, как и для A1), показывающий, вследствие чего происходит уменьшение годового стока. Как видно из рис. 4, к 1960-м гг. пик половодья р. Оби, приходящийся на летние месяцы (июнь, июль), заметно уменьшается (на ~23%) и при этом сдвигается к началу лета (на 20–25 дней). Немного сокращается и осенняя ветвь спада стока. Все это в итоге и приводит к отмеченному выше сокращению объема годового стока реки.

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ОБЬ-ИРТЫШСКОГО БАСЕЙНА В СВЯЗИ С ВОЗМОЖНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ КЛИМАТА

Неоднородность Обь-Иртышского бассейна хорошо проявляется на картах-схемах пространственного распределения составляющих водного баланса, отражающих эволюцию этого распределения по территории бассейна в XXI в. (рис. 5). Карты приведены только для одно-

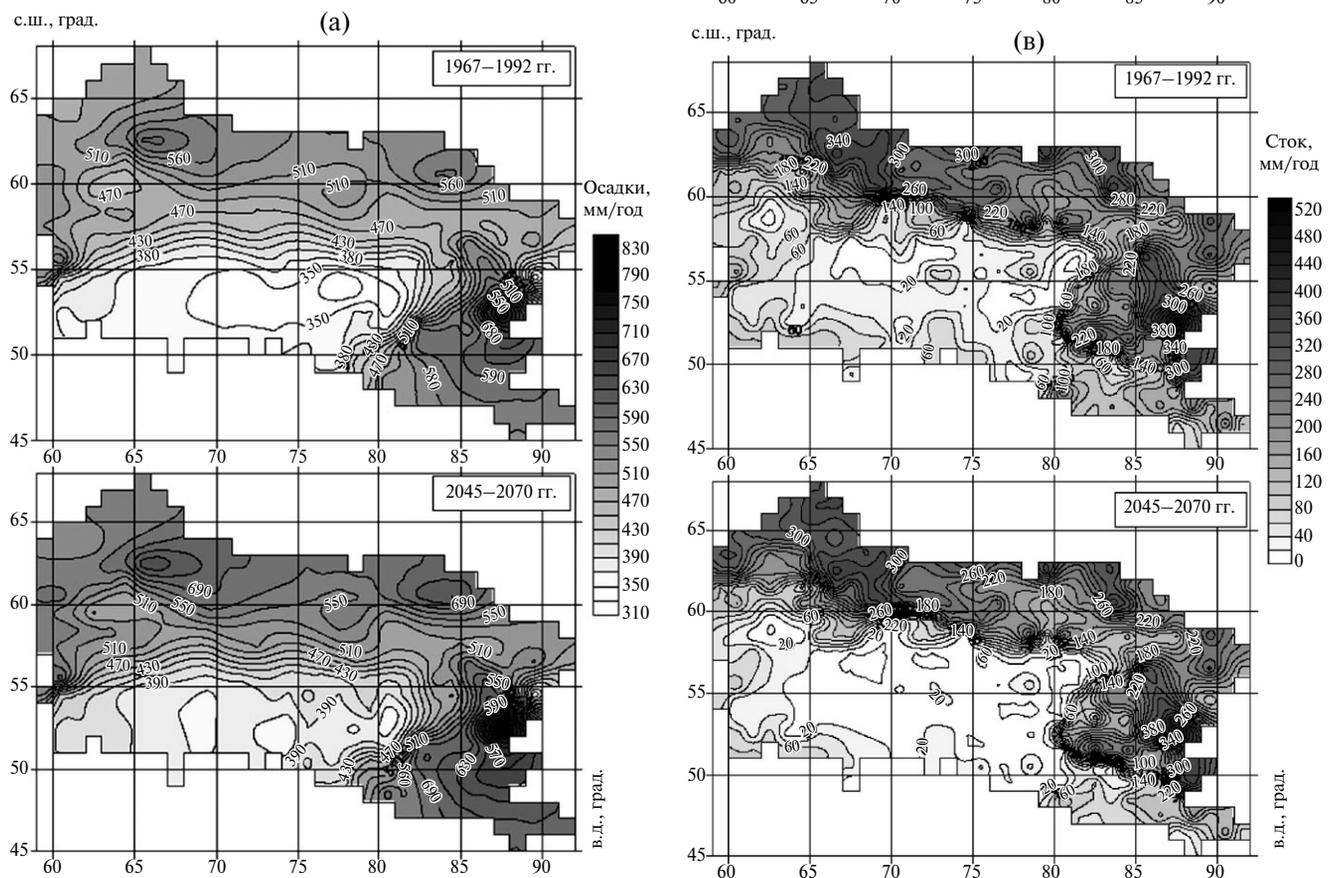


Рис. 5. Изменение пространственного распределения составляющих водного баланса Обь-Иртышского бассейна – осадков (а), суммарного испарения (б), стока (в) – в связи с возможными изменениями климата.

го из сценариев SRES A1, поскольку отличие приведенных данных на картах, построенных для других SRES сценариев, практически незаметны. На рис. 5 видно, что изменения составляющих водного баланса к середине 1960-х гг. имеют в рамках бассейна довольно регулярный характер. Кроме того, учитывая рассмотренный выше достаточно малый слой стока Иртыша, отметим, что на картах южной Российской части Иртышского бассейна и на севере Казахстана хорошо просматриваются бессточные области, которые к периоду 2045–2070 гг. увеличиваются и распространяются дальше к югу (рис. 5в).

Воспроизведение бессточных областей еще раз подчеркивает работоспособность модели SWAP, поскольку, согласно данным наблюдений, для бассейна р. Иртыш характерно наличие подобных областей, которые не отдают свои воды в речную систему Обь-Иртышского бассейна, а полностью расходуют их на испарение. На некоторых картах (рис. 6) [14] эти области даже не включаются в Обь-Иртышский бассейн. В связи с этим, а также из-за наличия обширных маловодных территорий степной и лесостепной зон, расположенных преимущественно в Казахской части бассейна Иртыша, р. Обь – первая по площади бассейна река РФ – по водоносности уступает Енисею и Лене



Рис. 6. Бессточные области в Обь-Иртышском бассейне (отмечены пятнистым серым цветом) [14].

с более благоприятными условиями формирования стока.

СРАВНЕНИЕ ПРОГНОЗОВ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТОКА РЯДА СИБИРСКИХ РЕК, ОСНОВАННЫХ НА СЕМЕЙСТВАХ СЦЕНАРИЕВ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА SRES И RCP

Имеет смысл сравнить прогнозы составляющих водного баланса Обь-Иртышского бассейна, полученные на основе семейства климатических сценариев SRES, с прогнозами климатических сценариев, полученными на основе упомянутого выше семейства климатических сценариев RCP. К сожалению, имеющиеся в литературе результаты по Обь-Иртышскому бассейну с использованием RCP-сценариев относятся только к прогнозированию стока. Тем не менее авторы статьи провели сопоставление результатов прогнозирования стока р. Оби, полученных в данной работе с использованием сценариев SRES, с прогнозными изменениями стока данной реки, полученными в [12] на основе расчета стока с применением линейной резервуарной модели климатического речного стока ИВММГ СО РАН и с использованием одного из RCP-сценариев, а именно самого жесткого сценария этого семейства – RCP 8.5. Проведенное сопоставление показало, что, если в настоящей работе (основанной на использовании сценариев изменения климата семейства SRES) климатический сток к 1960-м гг. уменьшается, то при использовании сценария RCP 8.5 он увеличивается.

Авторы настоящей работы получили также результаты сценарного прогнозирования климатического стока до 1960-х гг. для некоторых других рек Сибири на основе модели SWAP как с использованием SRES, так и RCP сценариев. Проведенные исследования показали, что, например, если для рек Оленек и Индигирка климатический сток, рассчитанный с применением сценариев семейства SRES, в целом возрастает [7], то для р. Лены он почти не меняется (скорее даже очень незначительно уменьшается) [6]. При этом указанное небольшое уменьшение стока р. Лены объясняется наличием зимой Сибирского максимума атмосферного давления в районе бассейна р. Алдан (восточная часть бассейна р. Лены), связанного с присутствием устойчивого зимнего Центральноазиатского антициклона, который в холодный период фактически “не пускает” осадки в данный район, что приводит к малому их годовому

приращению [6]. Это обстоятельство сказывается и на характере изменения климатического стока р. Лены. При прогнозировании же стока сибирских рек Индигирки, Колымы и Лены с использованием сценариев RCP [9, 25, 26] их климатический сток для всех указанных рек монотонно возрастает. То же самое происходит, как отмечено выше, и при прогнозировании стока р. Оби на основе сценария RCP 8.5 [12].

Для Обь-Иртышского бассейна уменьшение климатического стока при использовании сценариев SRES обусловлено тем, что в южной его части приходящие с солнечной радиацией энергетические ресурсы, “недоиспользованные” в исторический период (1967–1992 гг.) и приводящие к наличию здесь бессточных областей, затем еще и увеличивающиеся с изменением климата в прогнозируемый период (1993–2070 гг.), в значительной мере расходуются на испарение возрастающих в XXI в. осадков, что в конечном итоге приводит к сокращению общего стока с бассейна. Указанные региональные эффекты для рек Лены и Оби выражены в меньшей степени в сценарных прогнозах изменения климата семейства RCP, что и приводит к монотонному увеличению климатического стока этих рек (как и стока всех остальных упомянутых в данном разделе рек) при использовании в расчетах составляющих водного баланса метеорологических данных, полученных с помощью различных МОЦАО на основе сценариев RCP.

СРАВНЕНИЕ СЦЕНАРНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОГО ГОДОВОГО СТОКА р. ОБИ С ЕГО ЕСТЕСТВЕННОЙ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТЬЮ, ВЫЗВАННОЙ ПОГОДНЫМ ШУМОМ

Интересно сопоставить величину изменения стока р. Оби, связанного с возможными климатическими изменениями, с масштабом его естественной изменчивости, вызванной так называемым погодным шумом (weather noise), т.е. хаотической неустойчивостью атмосферных процессов, приводящих, в свою очередь, к случайным осцилляциям гидрологических процессов [10, 18, 20].

В последнее время для подобных целей часто используется метод критерия SNR (signal-to-noise), применяемый в климатологии для оценки значимости какого-либо антропогенного сигнала на фоне естественной стохастической

изменчивости климата (например, [27]). В настоящей работе SNR рассчитывался как:

$$\text{SNR} = \frac{|\Delta|}{Un_a}, \quad (1)$$

где Δ – климатическое изменение слоя стока р. Оби, полученное в районе стоковой ст. Салехард для периода 2045–2070 гг. и осредненное по всем четырем климатическим сценариям семейства SRES, по сравнению с базовым (историческим) периодом 1967–1992 гг. (оказалось $\Delta = -19$ мм/год); $Un_a = (R_{0.975} - R_{0.025})$ – мера естественной изменчивости годового стока, в которой $R_{0.975}$ и $R_{0.025}$ – квантили 97.5 и 2.5%-й обеспеченности годового слоя стока, мм/год, рассчитанные для указанных выше климатических периодов в предположении, что в их границах годовой сток имеет нормальное распределение (что проверено с использованием хи-квадрат теста), и также осредненные по четырем SRES-сценариям. Характеристика Un_a представляет собой диапазон, в который может с 95%-й обеспеченностью попасть значение годового стока в условиях стационарного климата.

Проведенные расчеты показали, что для семейства климатических сценариев SRES среднее значение $\text{SNR} = 0.19$ (значения SNR, рассчитанные для отдельных сценариев, практически не отличались друг от друга). Полученные результаты свидетельствуют о том, что полученное в рамках климатических сценариев семейства SRES климатическое изменение стока р. Оби к 1960-м гг. гораздо меньше (по абсолютной величине), чем естественная годовая изменчивость речного стока, вызванная погодным шумом.

ВЫВОДЫ

Оценена возможность использования модели взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP для прогнозирования изменений составляющих водного баланса на территории Обь-Иртышского бассейна.

Для четырех климатических сценариев МГЭИК – SRES: A1, A2, B1, B2, соответствующих заданным сценариям экономического, технологического, политического и демографического развития человеческой цивилизации до 2070 г., получены прогностические варианты динамики трехчасовых значений метеорологических элементов для каждой ячейки расчетной сетки Обь-Иртышского бассейна.

На основе полученных сценариев динамики метеорологических элементов рассчитана динамика составляющих водного баланса Обь-Иртышского бассейна до 1970 г. Показано, что при реализации всех четырех климатических сценариев к указанному сроку как в среднем по бассейну, так и в отдельных его частях (в верховьях и низовьях бассейна р. Оби, в бассейне р. Иртыш) увеличиваются осадки и суммарное испарение. Речной сток, напротив, уменьшается. Отметим, что количественные различия между полученными результатами расчетов по четырем использованным климатическим сценариям относительно невелики.

Продемонстрировано, что полученные в рамках климатических сценариев семейства SRES климатическое изменение стока р. Оби к 1960-м гг. гораздо меньше (по абсолютной величине), чем естественная годовая изменчивость речного стока, вызванная погодным шумом.

Приведена картина эволюции климатического гидрографа р. Оби в районе стоковой ст. Салехард, демонстрирующая, что значительно уменьшается пик весенне-летнего половодья реки.

Построены картосхемы пространственного распределения по Обь-Иртышскому бассейну составляющих водного баланса (осадков, суммарного испарения и стока) для исторического (базового) (1967–1992 гг.) и прогностического (2045–2070 гг.) периодов в соответствии с одним из климатических SRES-сценариев, а именно сценарием A1. На картосхемах отражена специфика изменений различных составляющих водного баланса в разных частях Обь-Иртышского бассейна. Особенно четко выражены наличие бессточных областей в бассейне Иртыша и увеличение их площадей в будущем.

Благодарности

Авторы выражают признательность сотрудникам Центра данных по глобальному речному стоку (The Global Runoff Data Centre, D–56068 Koblenz, Germany) за предоставленные материалы по речному стоку рек Обь и Иртыш.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бэйтс Б.К., Кундцевич З.В., У С., Палютикоф Ж.П. Изменение климата и водные ресурсы. Технический документ Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Женева: Секретариат МГЭИК, 2008. 228 с.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Методика оценки динамики водного и углеродного балансов экосистем.

- мы хвойного леса // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 81–92.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Методика сценарного прогнозирования изменения составляющих водного баланса северных речных бассейнов в связи с возможным изменением климата // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 4. С. 396–411.
 4. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
 5. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация процессов тепловлагообмена в системе “грунтовые воды–почва–растительный/снежный покров–атмосфера” для территорий с четко выраженной сезонной изменчивостью климата // Почвоведение. 2000. № 6. С. 733–748.
 6. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса в бассейне р. Лены в связи с возможным изменением климата // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 5. С. 476–487.
 7. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. Сценарное прогнозирование изменения составляющих водного баланса рек Оленек и Индигирка в связи с возможным изменением климата в районе Республики Саха (Якутии) // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41. № 6. С. 621–636.
 8. 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.
 9. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э. Особенности воздействия возможных климатических изменений на сток рек, расположенных в различных природных условиях // Информационные технологии естественных и математических наук. Сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. № 4. Ростов-на-Дону: ИЦРОН, 2017. С. 38–44.
 10. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Семенов В.А. Неопределенность расчетов и прогнозов составляющих водного баланса речных бассейнов, вызванная климатическим шумом // Научное обеспечение реализации “Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.”. Сб. науч. тр. Т. 1. Петрозаводск: Кар. НЦ РАН, 2015. С. 128–134.
 11. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Шурхно Е.А., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. Физико-математическое моделирование многолетней динамики составляющих водного баланса и снегозапасов в Обь-Иртышском речном бассейне // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46. № 4.
 12. Кузин В.И., Лантева Н.А. Гидрологические процессы в Обь-Иртышском бассейне в XXI веке // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. Т. II. Тр. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Барнаул, 2017. С. 136–141.
 13. Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Катцов В.М., Малевский-Малевич С.П., Мохов И.И., Надежина Е.Д., Семенов В.А., Спорышев П.В. Возможные антропогенные изменения климата России в XXI-м веке: оценки по ансамблю климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 38–49.
 14. Обь и Иртыш. Встреча великих сибирских рек [сайт]. URL: <https://uritsk.livejournal.com/185802.html> (дата обращения 17.04.2019).
 15. Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC assessment / Eds. Houghton J.T., Callander B.A., Varney S.K. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992. 200 p.
 16. 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., Harris N., Kattenberg A., Maskell K. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995. 572 p.
 17. 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.
 18. Gelfan A., Semenov V.A., Gusev E., Motovilov Y., Nasonova O., Krylenko I., Kovalev E. Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by the internal atmospheric variability // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2015. № 19. P. 2737–2754. www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/2737/2015/ doi:10.5194/hess-19-2737-2015.
 19. 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.
 20. Gusev Ye.M., Semenov V.A., Nasonova O.N., Kovalev E.E. Weather noise impact on the uncertainty of simulated water // Hydrol. Sci. J. 2017. V. 62. № 8. P. 1181–1199. DOI: 10.1080/02626667.2017.1319064.
 21. Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change / Concepts and Design Wigley T.M.L., Raper S.C.B., Hulme M., Salmon M. / Model Development and Scientific Programming Wigley T.M.L., Raper S.C.B., Osborn T.J. / Graphical User Interface Salmon M. Norwich, UK: Climatic Research Unit, University of East Anglia; New York, USA: National Communications Support Programme, UNDP/GEF, 2000. 52 p.
 22. Moss R., Babiker M., Brinkman S., Calvo E., Carter T., Edmonds J., Elgizouli I., Emori S., Erda L., Hibbard K., Jones R., Kainuma M., Kelleher J., Lamarque J.F., Manning M., Matthews B., Meehl J., Meyer L., Mitchell J., Nakicenovic N., O'Neill B., Pichs R., Riahi K., Rose S., Runci P., Stouffer R., van Vuuren D., Weyant J., Wilbanks T., van Ypersele J.P., Zurek M. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. IPCC expert meeting rep. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008. 132 p.

23. Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grubler A., Jung T.Y., Kram T., Lebre La Rovere E., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.-H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z. IPCC Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 599 p.
24. 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.
25. Nasonova O.N., Gusev Y.M., Volodin E.M., Kovalev E.E. Ability of a land surface model to predict climate induced changes in northern Russian river runoff during the 21st century // Proc. IAHS. 2015. № 371. P. 59–64.
26. Nasonova O.N., Gusev E.M., Volodin E.M., Kovalev E.E. Application of the Land Surface Model SWAP and Global Climate Model INMCM4.0 for Projecting Runoff of Northern Russian Rivers. 2. Projections and their uncertainties // Water Resour. 2018. V. 45. Suppl. 6. P. S85–S92.
27. Santer B.D., Mears C., Doutriaux C., Caldwell P., Gleckler P.J., Wigley T.M.L., Solomon S., Gillett N.P., Ivanova D., Karl T.R., Lanzante J.R., Meehl G.A., Stott P.A., Taylor K.E., Thorne P.W., Wehner M.F., Wentz F.J. Separating signal and noise in atmospheric temperature changes: The importance of timescale // J. Geophys. Res. 2011. V.116. D22105. DOI: 10.1029/2011JD016263.

SCENARIO FORECAST OF CHANGES OF THE WATER BALANCE COMPONENTS IN THE OB-IRTYSH RIVER BASIN IN CONNECTION WITH POTENTIAL CLIMATE CHANGE

© 2019 E. M. Gusev^{1,*}, O. N. Nasonova¹, E. A. Shurkhno¹, L. Y. Dzhogan¹

¹ Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences
Russia 119333 Moscow

*e-mail: sowaso@yandex.ru; gusev@iwpr.ru

Received: 07.05.2016

Revised version received: 16.06.2016

Accepted: 29.09.2017

An intergovernmental group of experts on climate control obtained the forecast options of the dynamics for the weather components of the Ob-Irtysh river basin in the XXI century for four global climatic scenarios of the family “Special Report on Emissions Scenarios” complying with the set scenarios of economic, technological, political, and demographic development of the civilization, which served as the basin for the estimation of the options of possible changes of the water balance components of the specified river basin up to the middle of the XXI century. The calculation technique is based on using the physically based model of heat and mass exchange between the land surface and atmosphere SWAP and the climatic scenarios generator MAGICC/SCENGEN. The changes of the annual flow of the Ob river due to potential global climate changes were compared herein with its natural fluctuations caused by the weather noise.

Keywords: water balance components, scenarios of climate changes, interaction between the land surface and atmosphere, physically based modeling, global databases, Ob-Irtysh basin.

DOI: 10.31857/S0321-0596465463-473