
**ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ
И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ**

УДК 556.048

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ
ДИНАМИКИ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА
И СНЕГОЗАПАСОВ В ОБЬ-ИРТЫШСКОМ РЕЧНОМ БАССЕЙНЕ¹**

© 2019 г. Е. М. Гусев^{1,*}, О. Н. Насонова¹, Е. А. Шурхно¹, Л. Я. Джоган¹, Г. В. Айзель¹

¹*Институт водных проблем РАН
Россия 119333 Москва
e-mail: sowaso@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.05.2016 г.

После доработки 16.06.2016 г.

Принята к публикации 29.09.2017 г.

Исследована возможность применения ранее разработанной методики расчета гидрографов стока северных рек для самой большой по площади бассейна российской реки — Оби, протекающей в суровых условиях Западной Сибири. В основу методики расчета положена модель тепло- и влагообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP (Soil–Water–Atmosphere–Plants) в сочетании с информационным обеспечением, основанным на глобальных базах данных по параметрам подстилающей поверхности и метеорологической информации, полученной по данным наблюдений метеорологических станций, расположенных в бассейне р. Оби. Оценена неопределенность стока р. Оби. Также исследована способность модели SWAP воспроизводить многолетнюю динамику средних значений снегозапасов по Обь-Иртышского бассейну.

Ключевые слова: гидрограф речного стока, формирование снежного покрова, составляющие водного баланса, физико-математическое моделирование, глобальные базы данных, Обь-Иртышский речной бассейн.

DOI: 10.31857/S0321-0596464347-358

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья — продолжение серии статей, посвященных моделированию формирования составляющих водного баланса (прежде всего, стока) на территориях бассейнов северных рек РФ [2, 5, 6, 8, 9, 12, 21, 22]. Актуальность данной тематики обоснована в указанной серии статей и связана как с созданием более точного инструментария решения гидрологических задач, так и с разработкой методики сценарных прогнозов изменения составляющих водного баланса речных бассейнов северного склона РФ [1, 7, 10].

Территория северных регионов РФ, согласно большинству сценариев изменения климата, подвергнется самым большим изменениям. Этот регион привлекает все больше внимания, поскольку как в самом Северном Ледовитом океа-

не, так и на его шельфе имеются большие запасы ископаемого топлива. Кроме того, указанный регион характеризуется огромным разнообразием водных ресурсов, включая самые большие реки мира. Поэтому вопрос о гидрологическом режиме бассейнов северных рек в современных условиях и о его изменении в связи с возможными изменениями климата крайне важен и требует разработки более точных методов оценки многолетней динамики водных ресурсов северных рек РФ в современный период и в предстоящие ближайшие десятилетия.

В указанных выше работах авторов настоящей статьи используется методика моделирования динамики составляющих водных ресурсов северных рек (как в настоящее время, так и в будущем), основанная на разработанной авторами физико-математической модели взаимодействия подстилающей поверхности суши

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00555) — раздел “Оценка естественной неопределенности значений речного стока с Обь-Иртышского бассейна” и РНФ (проект № 16-17-10039) — разделы “Схематизация Обь-Иртышского бассейна и его информационное обеспечение”, “Результаты многолетних расчетов составляющих водного баланса Обь-Иртышского бассейна”, “Расчеты формирования снежного покрова в Обь-Иртышском бассейне”.

с атмосферой SWAP (Soil–Water–Atmosphere–Plants) [2–4]. Данная методика продемонстрировала хорошее качество воспроизведения стока северных рек РФ и других показателей гидрологического режима их бассейнов для современного периода, что позволяет рассчитывать на адекватное воспроизведение динамики составляющих водного баланса в ближайшие десятилетия при наличии прогнозов динамики метеорологических элементов.

Цель настоящей работы — проверить возможность воспроизведения динамики составляющих водного баланса бассейна р. Оби — одной из пяти величайших рек земного шара, одной из крупнейших рек бассейна Северного Ледовитого океана и всей России, а также динамики снегозапасов в пределах территории бассейна на основе модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP, которая уже использована для гидрологических расчетов для ряда крупных рек северного склона РФ с перспективой сценарного прогнозирования изменения составляющих водного баланса бассейнов северных рек в связи с возможными изменениями климата.

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ БАСЕЙНА р. ОБИ

В основу описания физико-географических характеристик бассейна р. Оби положены данные, приведенные в [15, 16].

Обь берет свое начало на Алтае, длина ее от слияния рек Бии и Катунь составляет 3660 км, а от истока Иртыша (ее основного притока) — 5410 км. Площадь Обь-Иртышского бассейна (рис. 1), самого крупного речного бассейна России — 2990 тыс. км². Среднегогодовой объем речного стока р. Оби — 403 км³/год, что соответствует слою стока в 134 мм/год. Река пересекает с юга на север территорию Западной Сибири и на всем своем протяжении, кроме истока, Обь представляет собой типично равнинную реку с малыми уклонами и широкой заболоченной долиной, достигающей местами ширины несколько десятков километров. Впадая в Обскую губу Карского моря, река образует дельту с многочисленными рукавами и островами.

Главным притоком р. Оби является р. Иртыш. Длина р. Иртыша составляет 4248 км, что превышает длину самой Оби. Иртыш — самая длинная река-приток в мире. Протекает по территории Китая, Казахстана и России. Истоки Иртыша находятся на границе Монголии и Китая, на восточных склонах хребта Монгольский Алтай.



Рис. 1. Территория Обь-Иртышского бассейна.

Обь с Иртышом пересекают несколько природно-климатических зон: от полупустыни на юге до тундры на севере. Большая часть бассейна покрыта тайгой и болотами. В зоне тундры распространена многолетняя мерзлота.

Климат Западной Сибири умеренно континентальный. Зимой и летом в южную часть бассейна поступает арктический воздух. Весной и осенью наблюдается активное проникновение циклонов, приносящих влажный воздух с Атлантики. Континентальность климата возрастает в основном в направлении с севера на юг. Средняя температура января понижается до -15°C в юго-западной части бассейна и до -30°C в его северо-восточной части. Средняя температура июля достигает 5°C на севере бассейна и 20°C в его южной части.

Согласно оценкам, приведенным в указанных выше работах, годовая сумма осадков изменяется от 400 до 800 мм. Наибольшее количество осадков выпадает в верховьях Оби, приуроченных к горным системам Алтая. Второй их максимум — на Полярном Урале. На равнинной части больше всего осадков выпадает в Среднем Приобье (600–650 мм). К северу сумма осадков уменьшается.

В соответствии с распределением по территории бассейна увлажнения и тепловых ресурсов суммарное испарение в пределах водосборной площади Оби в основном подчиняется широтной зональности, за исключением горных об-

ластей, где преобладает влияние высотной поясности. В истоках Оби и Иртыша (высокогорная часть бассейна) суммарное испарение составляет 250–300 мм/год. Наибольшие величины испарения (450 мм) приходится на среднюю часть водосбора, расположенную в зоне мелколиственных лесов и южной тайги. Севернее значения испарения снижаются.

Основную массу воды р. Обь получает в результате таяния снегов. Река характеризуется сравнительно невысоким и растянутым (до 4 мес) весенне-летним половодьем, повышенным стоком летне-осеннего периода и низкой зимней меженью. Средняя продолжительность половодья изменяется от верховьев до устья от 100 до 140 дней. На период весенне-летнего половодья приходится существенная доля годового стока. Питание р. Иртыша смешанное: в верховьях снеговое, ледниковое и, в меньшей степени, дождевое; в нижнем течении — снеговое и дождевое.

Речной сток в бассейне Оби зарегулирован в основном малыми и небольшими водохранилищами, в регионе имеется только одно крупное водохранилище в верхнем течении реки — Новосибирское. Среднегоголетний объем стока воды этого водохранилища в створе гидроузла равен 50–55 км³/год, что составляет 12–14% среднегоголетнего объема речного стока в устье Оби.

Что касается Иртыша, то эта река на казахской территории в своем верхнем течении зарегулирована водохранилищами Иртышского каскада ГЭС: Бухтарминским, Усть-Каменогорским и Шульбинским. Среднегоголетние сбросы через гидростворы Бухтарминской, Усть-Каменогорской и Шульбинской ГЭС составляют соответственно 4.6, 4.8 и 1.7% среднегоголетнего объема стока в устье реки Оби.

Основываясь на приведенных данных, в целом речной сток Обь-Иртышского бассейна можно считать слабо зарегулированным, что и дает возможность попытаться использовать для расчета динамики составляющих водного баланса бассейна модель SWAP без учета режима сбросов указанных выше водохранилищ.

В пределах равнинной части Обь-Иртышского бассейна расположены тундровая, лесотундровая, лесная, лесостепная и степная зоны с характерными для них почвами и растительностью. В северной части территории равнины распространены торфянисто-болотные и торфяно-болотные почвы, в южной ча-

сти наряду с ними — обычные солонцы, солоды, встречаются также солончаки. Зональные типы почв — тундрово-глебовые, подзолистые, дерново-подзолистые, черноземы и темно-каштановые — приурочены к относительно дренированным территориям.

Широкое распространение болот, а также континентальность климата влияют на состав основных лесообразующих пород. Наряду с еловыми и сосновыми лесами здесь широко распространены кедровые и лиственничные, встречаются пихтовые. Большие площади занимает в Западной Сибири пойменная растительность, представленная преимущественно лугами и, в меньшей мере, кустарниками.

СХЕМАТИЗАЦИЯ ОБЬ-ИРТЫШСКОГО БАСЕЙНА И ЕГО ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Использование SWAP для проведения модельных расчетов динамики составляющих водного баланса и снежного покрова Обь-Иртышского бассейна предполагает разбиение его территории на ряд расчетных ячеек, как, например, в [17, 26]. Как видно из рис. 2, Обь-Иртышский бассейн до стоковой ст. Салехард представлен совокупностью 441 ячейки регулярной пространственной сетки с разрешением 1×1 по широте и долготе.

В пределах каждой ячейки моделирование ее теплового и водного режима проводится независимо от других ячеек. Величина стока с расчетных ячеек бассейна (с учетом площадей, рассчитанных на основе реальных водосборных территорий, привязанных к ячейке [26]) служит входной информацией для следующего блока модели — блока трансформации стока в речной сети. В настоящей работе за основу была принята схематизация речных бассейнов, разработанная в [31] и подвергнутая авторами небольшой коррекции. В полученной схематизации ячейки бассейнов соединены каналами русловой сети, трансформация стока в которых может рассчитываться с использованием различных подходов. В данной работе для этой цели применена простая линейная модель формирования водного баланса в русле [24, 28].

Необходимое при проведении гидрологических расчетов информационное обеспечение модели SWAP включало в себя заданную для каждой расчетной ячейки приземную метеорологическую информацию (температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра,

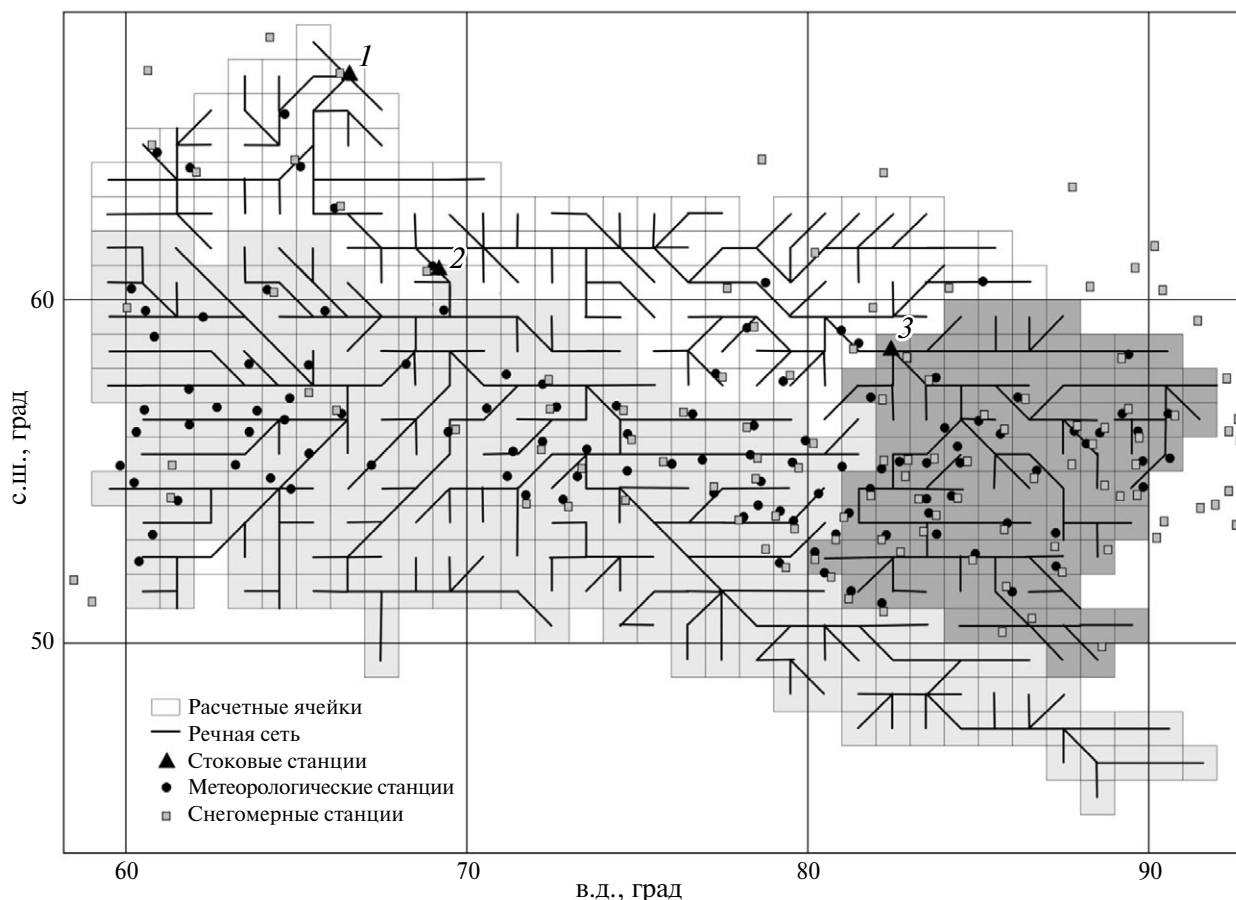


Рис. 2. Расчетная схема Обь-Иртышского бассейна и его речной сети. Светло-серым цветом отмечен бассейн р. Иртыша до стокосой ст. Ханты-Мансийская (2), темно-серым — часть бассейна р. Оби до стокосой ст. Колпашево (3), не закрашена нижняя часть Обь-Иртышского бассейна до стокосой ст. Салехард (1).

атмосферные осадки, а также величин входящих потоков длинно- и коротковолновой радиации) с трехчасовым временным разрешением и параметры подстилающей поверхности, а именно параметры почвы, растительного покрова, топографические данные бассейна. В данной работе метеорологические характеристики были получены из данных наблюдений 115 метеорологических станций (рис. 2), для которых качество информации соответствовало поставленной задаче (при этом величины входящих потоков коротковолновой и длинноволновой радиации рассчитывались по данным стандартных метеорологических измерений по методике, приведенной в [2, 29]). Интерполяция значений метеорологических элементов в центры расчетных ячеек бассейна проводилась с использованием модифицированной процедуры кригинга [3, 11]. Параметры подстилающей поверхности бассейна взяты из глобальных баз данных, а затем наиболее важные из них уточнены, как и в вышеупомянутых работах авторов [2–4], на основе метода оптимизации с исполь-

зованием данных по стоку, измеренному на трех стокосых станциях рек Оби и Иртыша (рис. 2). Проверка результатов расчетов проводилась по данным о стоке на тех же стокосых станциях, но за более длительные периоды наблюдений.

При построении базы данных растительного покрова, адаптированной под модель SWAP, за основу была принята глобальная база данных из проекта GSWP-2 (Second Global Soil Wetness Project) [18, 32]. При этом использованы классификация типов подстилающей поверхности IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme), включающая в себя 17 типов поверхности суши. База данных скорректирована для устранения грубых несоответствий и ошибок, а также дополнена рядом специфических параметров, необходимых при работе с моделью SWAP. Подробности указанной корректировки изложены в [3, 13]. Там же содержится и перечень параметров растительного покрова, используемых в модели SWAP.

При подготовке адаптированной под модель SWAP базы данных по почвенным параметрам за основу были приняты данные из информационной базы ISLSCP-II) / GSWP-2 (International Satellite Land-Surface Climatology Project, Initiative II), которые, в свою очередь, взяты из IGBP-DIS (Data Information System). Указанные данные также частично скорректированы в целях устранения неправдоподобных значений ряда параметров и согласования их между собой и с параметрами растительного покрова [13].

Для последней группы данных (топографических характеристик, включающих среднюю высоту ячейки расчетной сетки и углы наклона поверхности ячейки в меридиональном и широтном направлениях) высоты взяты из информационной базы Центра данных по системам наблюдений за ресурсами Земли — EDC (Earth Resources Observation Systems Data Center), углы наклона рассчитаны по данным о средних высотах соседних ячеек.

Набор характерных для водосборов северных рек параметров, подлежащих оптимизации, определен и обоснован в [3, 11]. Для Обь-Иртышского бассейна число оптимизируемых параметров равнялось 8. К ним относились, в частности, корректирующие множители (общие для всего бассейна) к значениям коэффициента фильтрации почвы K_0 , толщины корнеобитаемого слоя h_r , альbedo растительного покрова в теплый период (в отсутствии снега) alb_{sum} , альbedo растительного покрова в зимний период (при наличии снега на элементах растительности) alb_{win} , обозначенные как 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 $h_0 = k_{h0} h_r$, где k_{h0} — множитель, общий для всего бассейна, который также калибровался. Наконец, калибровались такие параметры, как альbedo свежеснежного покрова alb_{sn} , коэффициент шероховатости n в формуле Маннинга и эффективная скорость движения воды в русле u_e .

Поскольку территория Обь-Иртышского бассейна очень большая, для улучшения качества расчетов она разделена на три части (рис. 2) (как и бассейн р. Лены в [8]), для каждой из которых находился свой оптимальный набор параметров. Для нахождения оптимальных параметров подстилающей поверхности первой части Обь-Иртышского бассейна — бассейна р. Иртыша — использовались наблюдения за суточным стоком на стоковой ст. Ханты-Мансийск (кали-

бровочный период — 1978–1987 гг.), для второй части бассейна — наблюдения за суточным стоком на стоковой ст. Колпашево (калибровочный период — 1968–1977 гг.), а для оставшейся третьей части — наблюдения за суточным стоком на стоковой ст. Салехард (калибровочный период — 1968–1977 гг.) (рис. 2). В последнем случае входной сток для двух ячеек, соседствующих с ячейками, в которых находятся стоковые станции Ханты-Мансийск и Колпашево, принимался равным не нулю (как для всех остальных пограничных ячеек третьей части бассейна), а величине рассчитанного стока соответственно с первой и второй частей Обь-Иртышского бассейна.

Калибровка модельных параметров для выбранных бассейнов проводилась автоматизировано с использованием метода глобального поиска экстремума целевой функции SCE-UA [19]. При этом ставилась задача не только достижения максимума целевой функции, в качестве которой использовалась эффективность расчета суточного стока по Нэшу и Сатклиффу Eff [27], но также и соблюдения условия для абсолютного значения систематической ошибки расчетов: $|Bias| \leq 5\%$.

С использованием статистик Eff и $Bias$ для каждого из трех подбассейнов найден свой набор оптимальных значений параметров, что позволяет проводить расчеты составляющих водного баланса для любой части Обь-Иртышского бассейна.

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНИХ РАСЧЕТОВ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА ОБЬ-ИРТЫШСКОГО БАССЕЙНА

Оценка полученных при гидрологическом моделировании результатов проводилась по двум статистическим критериям соответствия рассчитанных и измеренных суточных значений стока: систематической ошибке $Bias$, равной разности между средними рассчитанных и измеренных значений стока, и упомянутой эффективностью расчета Eff по Нэшу и Сатклиффу.

На рис. 3 показаны результаты сравнения измеренных и рассчитанных значений суточных слоев стока для упомянутых выше трех стоковых станций Обь-Иртышского бассейна. Полученные результаты свидетельствуют о хорошем соответствии измеренных и рассчитанных данных — для ст. Салехард (расчетный период — 1967–1999 гг.) эффективность расчета суточного стока $Eff = 0.85$, систематическая ошибка

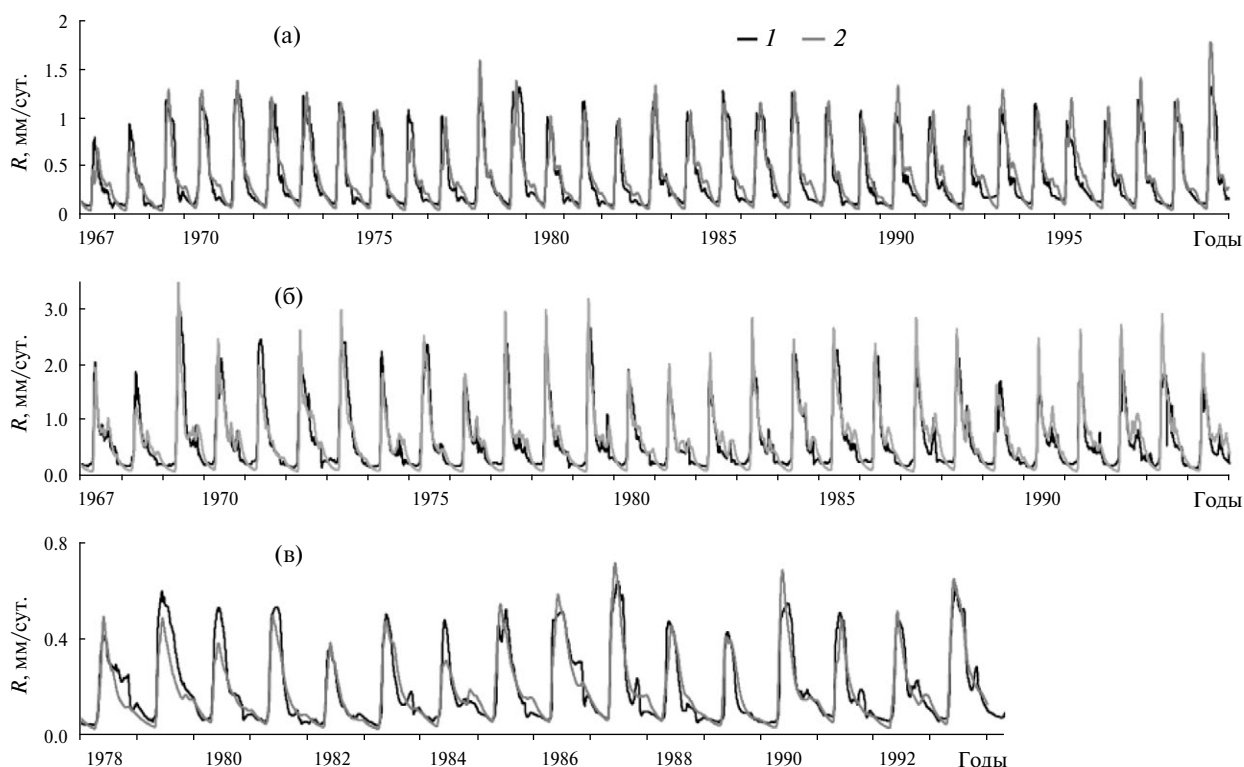


Рис. 3. Динамика измеренных (1) и рассчитанных (2) суточных значений слоя стока р. Оби в районе ст. Салехард (а) и ст. Колпашево (б), а также р. Иртыша в районе ст. Ханты-Мансийск (в).

$Bias = 5.5\%$, для ст. Колпашево (расчетный период – 1967–1994 гг.) $Eff = 0.82$, $Bias = 3.4\%$, для ст. Ханты-Мансийск (расчетный период – 1978–1997 гг.) $Eff = 0.84$, $Bias = -6.2\%$.

Можно заметить на рис. 3б, что рассчитанные пиковые значения стока в районе ст. Колпашево часто завышены, и в то же время часто занижены его меженные значения. Такое несколько худшее соответствие форм измеренных и рассчитанных гидрографов стока (по сравнению с гидрографами стока, измеренного на других станциях) отражается на немного сниженном значении Eff (0.82). Указанный эффект в районе ст. Колпашево может быть связан с недоучетом регулирования стока Новосибирским гидроузлом.

Представляет интерес сравнение полученных результатов для Обь-Иртышского бассейна с результатами аналогичных расчетов, выполненных в работе [30] на основе всемирно известной и широко используемой в гидрологических расчетах модели VIC [25]. В [30], к сожалению, приведена статистика только для месячных значений стока, поэтому и сопоставление будет проводиться только для месячных значений.

Для ст. Салехард при использовании модели SWAP для расчета месячных слоев стока

$Eff = 0.87$, $Bias = 5.5\%$, при использовании VIC $Eff = 0.79$, $Bias = -0.9\%$. При расчете месячного стока р. Иртыша в районе ст. Ханты-Мансийск для модели SWAP $Eff = 0.88$, $Bias = -6.2\%$. В [30] сток р. Иртыш был рассчитан для стокосовой ст. Тобольск, расположенной на ~400 км выше по течению ст. Ханты-Мансийск, при этом $Eff = 0.78$, $Bias = 2.1\%$.

Приведенное сравнение показывает, что эффективность расчетов стока с использованием модели SWAP выше эффективности модели VIC. Систематическая же ошибка при расчете стока в районе Обь-Иртышского бассейна с использованием SWAP несколько выше, чем с использованием VIC. Однако в обоих случаях их оценки близки к точности измерения стока. Поэтому можно сделать вывод, что качество расчетов стока Обь-Иртышского бассейна с применением модели SWAP, по крайней мере, не ниже качества расчетов с использованием VIC.

На рис. 4 показаны климатические (усредненные по расчетным периодам) годовые гидрографы месячных слоев стока для трех использованных в работе стокосовых станций. Видно, что соответствие рассчитанных и измеренных гидрографов достаточно хорошее. Статистика соответствия подтверждает этот факт: для трех

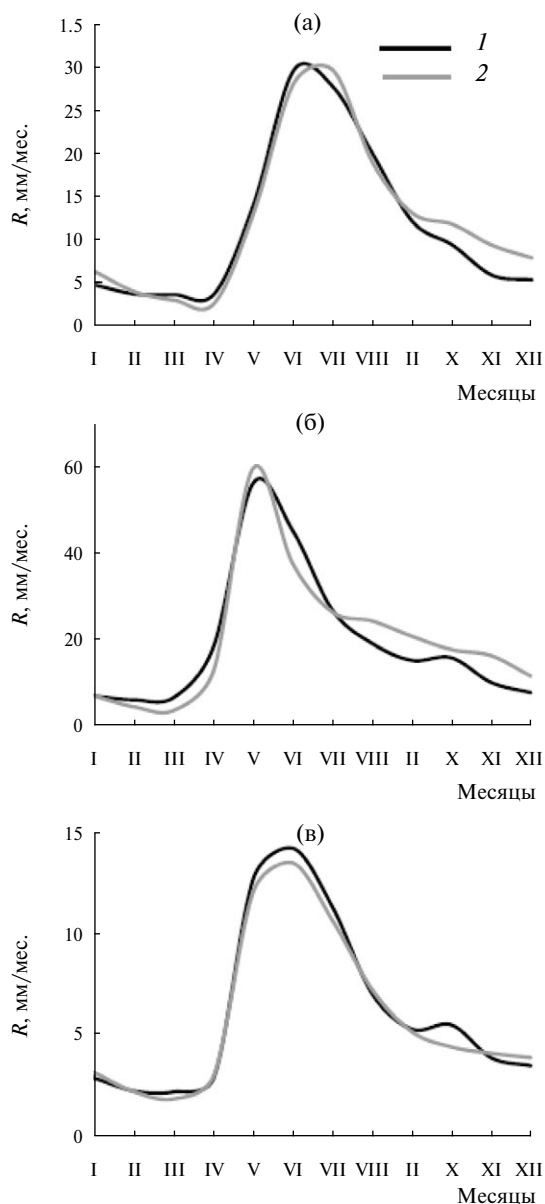


Рис. 4. Климатические (усредненные по расчетным периодам) измеренные (1) и рассчитанные (2) годовые гидрографы месячных слоев стока р. Оби в районе станций Салехард (а) и Колпашево (б), а также р. Иртыша в районе ст. Ханты-Мансийск (в).

станций расчета климатического месячного стока $0.92 < Eff < 0.98$, $3.2 < Bias < 5.5\%$.

Модель SWAP позволяет рассчитывать все составляющие водного баланса как всего бассейна, так и отдельных его частей. На рис. 5 приведена динамика годовых величин осадков, суммарного испарения и стокообразования для трех выбранных частей Обь-Иртышского бассейна, а также для всего бассейна в целом.

Интерполированные по территории бассейна с помощью операции кригинга значения

измеренных годовых осадков, в среднем равные 470 мм, варьируют по трем выделенным подбассейнам и по годам в диапазоне от 350 до 650 мм/год, что примерно соответствует данным, представленным в [15, 16]. При этом наименьшие величины осадков относятся к бассейну р. Иртыша, наибольшие — к северной части Обь-Иртышского бассейна.

Рассчитанное испарение также варьирует в среднем от 360 (в районе бассейна р. Иртыш) до 260 мм в нижней (северной) части бассейна р. Оби, составляя в среднем по всему Обь-Иртышскому бассейну ~320 мм, что также приблизительно соответствует данным об испарении в [15, 16].

Что касается стока, то наибольшая интенсивность его формирования приходится в основном на бассейн непосредственно р. Оби, меньшая — на бассейн р. Иртыш.

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЕЛИЧИН РЕЧНОГО СТОКА С ОБЬ-ИРТЫШСКОГО БАСЕЙНА

Как видно из приведенных в предыдущем разделе результатов оценок составляющих водного баланса и данных измерений речного стока с Обь-Иртышского бассейна, все указанные переменные (в масштабе как суток, так и лет) обладают естественной изменчивостью. Данная изменчивость, как показано в [14, 20, 23], обусловлена хаотическим характером атмосферных процессов (так называемым “климатическим шумом”), неустойчивостью по отношению к малым ошибкам в задании начальных условий при расчете эволюции метеорологических характеристик. Как показано в [20], формирование речного стока и его естественной неопределенности в рамках конкретного бассейна происходит под влиянием вынуждающей силы (“forcing”), в качестве которой выступают атмосферные процессы, при этом неустойчивость их характеристик приводит к неустойчивости значений речного стока. Причина возникновения атмосферного хаоса — объективная неустойчивость по отношению к начальным условиям: малое изменение начального условия со временем приводит к достаточно большим изменениям динамики системы. Для нелинейной системы с диссипацией невозможно конкретно предсказать ход ее развития, поскольку начальные условия состояния атмосферы никогда не могут быть заданы с абсолютной точностью.

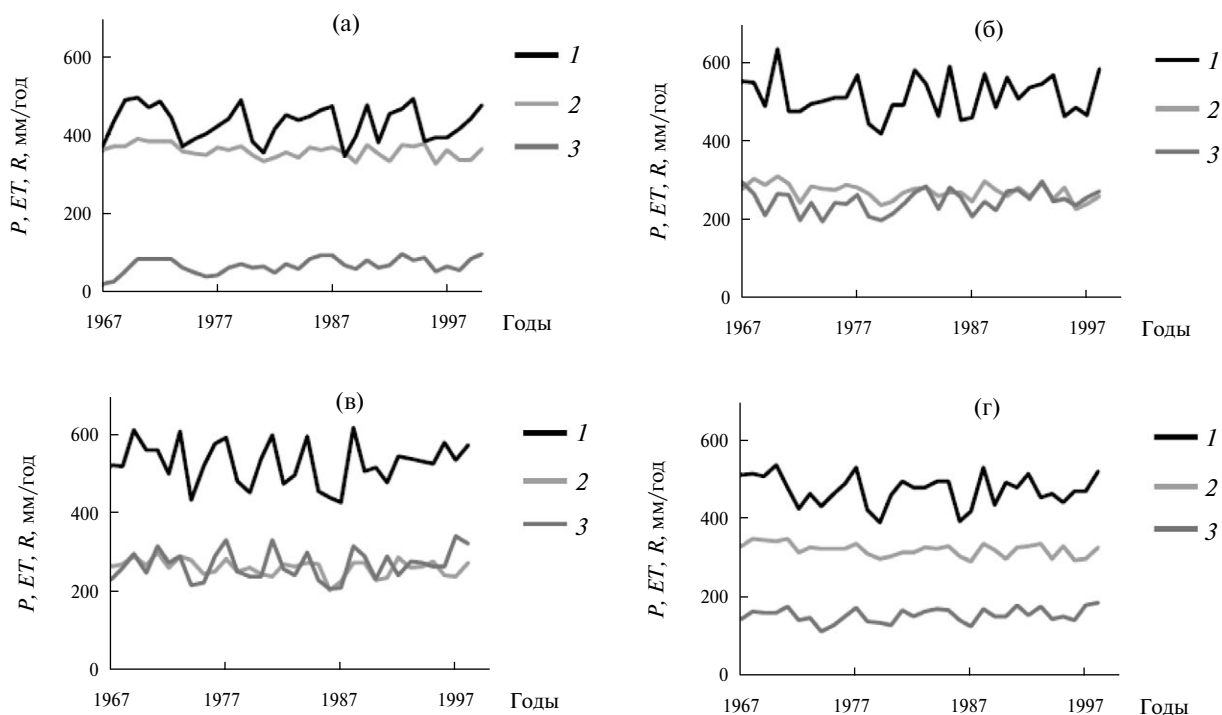


Рис. 5. Динамика годовых значений осадков (1), суммарного испарения (2) и стокообразования (3) для трех выбранных частей Обь-Иртышского бассейна: бассейна р. Иртыша до ст. Ханты-Мансийск (а), верхней части бассейна р. Оби до ст. Колпашево (б), нижней части бассейна р. Оби до ст. Салехард (в), а также для Обь-Иртышского бассейна в целом (г).

В этом разделе рассмотрим оценку масштаба указанной неопределенности стока для р. Оби. В качестве меры неопределенности Un той или иной положительно определенной геофизической характеристики X (в данном случае речного стока), имеющей случайную составляющую, будем использовать следующий показатель [14]:

$$Un = (x_{0.975} - x_{0.025}) / M(X), \quad (1)$$

где $x_{0.975}$ и $x_{0.025}$ — квантили 97.5- и 2.5%-й обеспеченности величины X , $M(X)$ — ее математическое ожидание. Указанная характеристика

представляет собой отношение диапазона, в который может с 95%-й обеспеченностью попасть случайная величина, к ее среднему значению. Саму разность $x_{0.975} - x_{0.025}$ назовем абсолютной неопределенностью величины X .

На рис. 6а показаны средние за 33 года значения рассчитанного годового стока и диапазон его естественной изменчивости (абсолютной неопределенности), а также измеренные и рассчитанные конкретные реализации стока за 1967–1999 гг. Само значение неопределенности Un годового стока для р. Оби (в предположении,

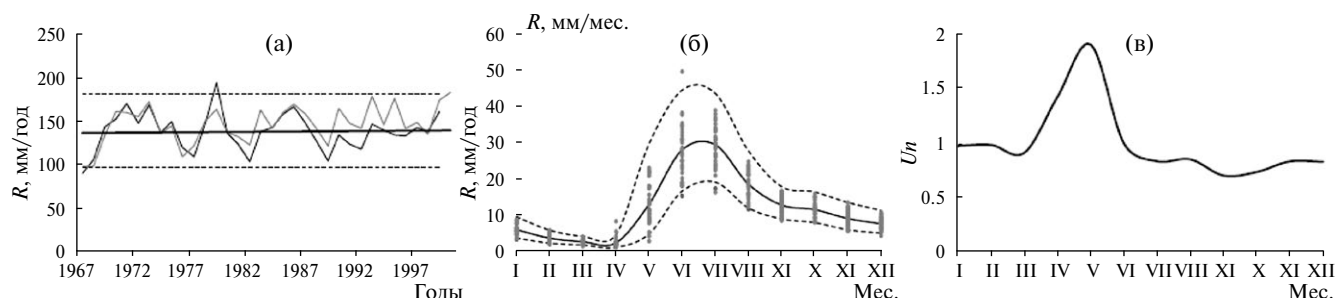


Рис. 6. Значения неопределенности слоя стока р. Оби в районе стоковой ст. Салехард: (а) — абсолютная неопределенность годового стока (черная жирная прямая линия — среднее за расчетный период значение рассчитанного годового стока, пунктирные прямые линии показывают диапазон абсолютной неопределенности годового стока, черная и серые тонкие линии показывают конкретные реализации годового стока — измеренного и рассчитанного соответственно); (б) — абсолютная неопределенность месячного стока (черная жирная и пунктирные линии показывают средние за расчетный период значения рассчитанных месячных слоев стока и диапазон их неопределенности соответственно, серые точки — конкретные реализации в разные годы рассчитанных месячных значений слоя стока); (в) — внутригодовая динамика неопределенности месячных значений слоя стока.

что функция распределения вероятности значений стока может быть аппроксимирована лог-нормальным распределением) оценено на основе годовых значений стока в районе ст. Салехард и оказалось равным 0.57.

На рис. 6б показан климатический (осредненный за 1967–1999 гг.) гидрограф рассчитанного месячного стока р. Оби, диапазон его абсолютной неопределенности (оцененной с принятием указанного выше предположения) и конкретные реализации измеренных месячных значений стока за указанные годы. На рис. 6в представлен годовой ход значений неопределенности месячного стока.

Как видно из приведенных рис. 6а, 6б, относительные значения неопределенностей для месячного стока, естественно, выше, чем для годового. При этом пик значений неопределенности месячного стока приходится на апрель–май, т.е. на период начала весеннего половодья. Это объясняется тем, что в этот период действуют две причины, обуславливающие неопределенность стока: неопределенность метеорологических характеристик, от которых зависит интенсивность стокообразования, и неопределенность момента начала формирования стока, который меняется от года к году.

РАСЧЕТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ОБЬ-ИРТЫШСКОМ БАССЕЙНЕ

Поскольку, как сказано выше, основная часть стока р. Оби формируется за счет снеготаяния, представляет интерес оценить качество моде-

лирования с использованием SWAP-динамики снегозапасов в Обь-Иртышском бассейне.

На рис. 7а показана многолетняя динамика величин снегозапасов, осредненных по всему бассейну. Средние по бассейну снегозапасы определялись на основе данных измерений 128 маршрутных снегосъемок на 115 снегомерных станциях, расположенных непосредственно в бассейне или рядом с ним (рис. 2). Поскольку не всегда имелись данные снегосъемок за конкретные сутки для каждой станции, в целях повышения качества оценки средних по бассейну измеренных снегозапасов осреднения данных снегомерных наблюдений проводились только для тех суток, для которых количество маршрутов превышало 85. Рассчитанные средние по бассейну снегозапасы находились путем осреднения их величин, полученных для каждой ячейки на основе модели SWAP с учетом площадей ячеек. Среднеквадратическое отклонение измеренных и рассчитанных средних по бассейну снегозапасов оказалось ~ 10 мм, эффективность расчетов по Нэшу и Сатклиффу — 0.80. Учитывая точный характер процедуры измерения снегозапасов, а также редкость снегомерной сети для территории Обь-Иртышского бассейна (одна снегомерная станция на ~ 25 тыс. км²), соответствие измеренных и рассчитанных средних по бассейну снегозапасов можно признать достаточно хорошим.

Хорошее качество расчета снежного покрова подтверждает интегральная функция его распределения P (обеспеченность) по территории

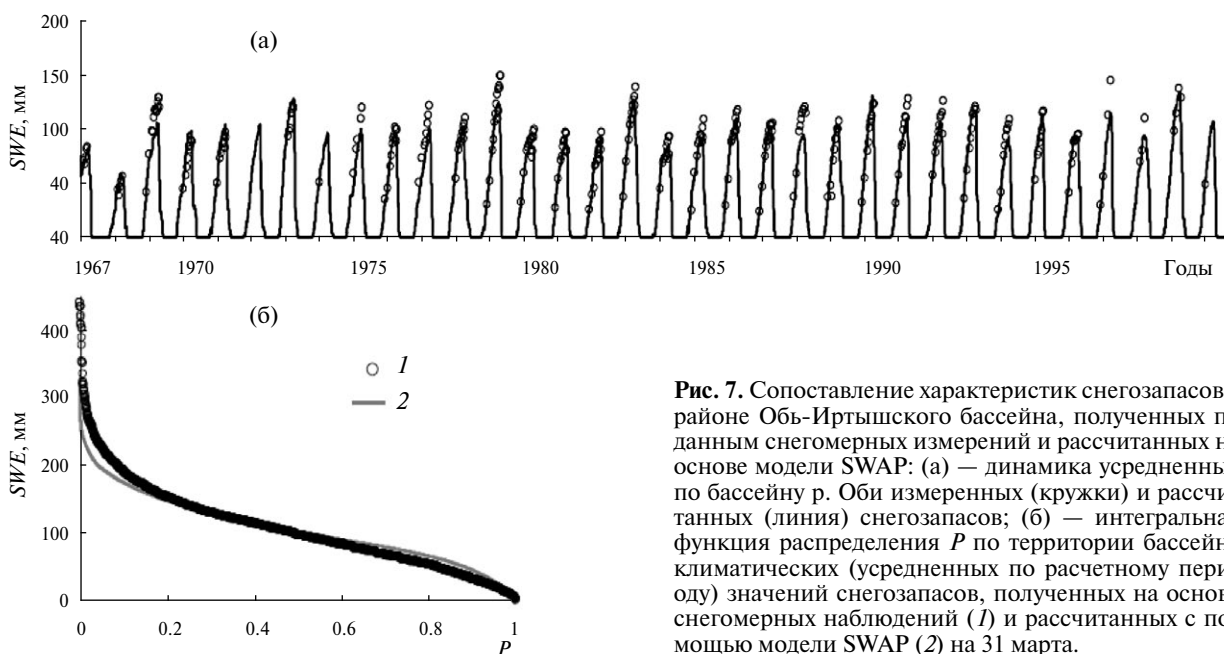


Рис. 7. Сопоставление характеристик снегозапасов в районе Обь-Иртышского бассейна, полученных по данным снегомерных измерений и рассчитанных на основе модели SWAP: (а) — динамика усредненных по бассейну р. Оби измеренных (кружки) и рассчитанных (линия) снегозапасов; (б) — интегральная функция распределения P по территории бассейна климатических (усредненных по расчетному периоду) значений снегозапасов, полученных на основе снегомерных наблюдений (1) и рассчитанных с помощью модели SWAP (2) на 31 марта.

бассейна. На рис. 76 приведен пример сопоставления интегральных функций распределения климатических величин снегозапасов (усредненных по расчетному периоду) по бассейну на 31 марта, полученных на основе маршрутных снегомерных наблюдений и данных о снегозаписах в расчетных ячейках Обь-Иртышского бассейна, рассчитанных на основе модели SWAP.

ВЫВОДЫ

В силу очень большой площади Обь-Иртышского бассейна методика оптимизации параметров подстилающей поверхности бассейна, использованная во многих предыдущих работах авторов, несколько модифицирована. В частности, Обь-Иртышский бассейн разделен авторами на три части, для каждой из которых находился свой набор оптимальных значений параметров.

Проведенные с использованием модели теплообмена подстилающей поверхности суши с атмосферой SWAP расчеты составляющих водного баланса Обь-Иртышского бассейна показали, что модель SWAP в сочетании с информационным обеспечением, основанным на глобальных базах данных по параметрам подстилающей поверхности и на данных наблюдений метеорологических станций, при проведении указанной выше оптимизации нескольких наиболее важных модельных параметров для трех частей Обь-Иртышского бассейна позволяет достаточно хорошо воспроизводить гидрографы суточного и месячного стока в различных створах р. Оби и ее притоков, а также динамику и других составляющих водного баланса в бассейне.

Проведена оценка естественной неопределенности годовых и месячных величин слоя стока в замыкающем створе р. Оби в районе ст. Салехард. Данная неопределенность обусловлена климатическим шумом метеорологических элементов, которые формируют динамику гидрологического цикла территории Обь-Иртышского бассейна. Показано, что пик значений неопределенности месячного стока р. Оби приходится на апрель–май, т.е. на период начала весеннего половодья.

Воспроизведение моделью SWAP динамики средних по Обь-Иртышскому бассейну снегозапасов также можно признать вполне удовлетворительным, что свидетельствует об адекватной формализации процессов формирования снежного покрова моделью SWAP.

Благодарности

Авторы выражают признательность сотрудникам Мирового центра данных по речному стоку (The Global Runoff Data Centre, D – 56068 Koblenz, Germany) за предоставленные данные по стоку рек Оби и Иртыша.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование процессов теплообмена суши с атмосферой в локальном масштабе для территорий с многолетней мерзлотой // Почвоведение. 2004. № 9. С. 1077–1092.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация тепло- и влагообмена на поверхности суши при сопряжении гидрологических и климатических моделей // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25. № 4. С. 421–431.
5. 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.
6. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Моделирование стока рек северо-западной части России с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP // Вестн. РФФИ. 2013. № 6 (78). С. 17–23.
7. 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.
8. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Физико-математическое моделирование многолетней динамики суточных значений речного стока и снегозапасов в бассейне р. Лены // Вод. ресурсы. 2016. Т. 43. № 1. С. 24–36.
9. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. Моделирование стока рек Оленек и Индигирка и использование модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP // Вод. ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 496–506.
10. 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.

11. 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.
12. 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.
13. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э. Моделирование составляющих теплового и водного балансов поверхности суши Земного шара // *Вод. ресурсы*. 2006. Т. 33. № 6. С. 664–676.
14. 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: КарНЦ РАН, 2015. С. 128–134.
15. Реки и озера мира: энциклопедия. М.: Энциклопедия, 2012. 924 С.
16. Рыбальский Н.Г., Омеляненко В.А., Думнов А.Д., Муравьева Е.В., Мирошник Н.А., Самотесов Е.Д., Борискин Д.А. Государственный доклад “О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2012 году”. М.: НИИ-Природа, 2013. 370 с.
17. Boone A., Habets F., Noilhan J., Clark D., Dirmeyer P., Fox S., Gusev Y., Haddeland I., Koster R., Lohmann D., Mahanama S., Mitchell K., Nasonova O., Niu G.-Y., Pitman A., Polcher J., Shmakin A.B., Tanaka K., van den Hurk B., Verant S., Verseghy D., Viterbo P., Yang Z.-L. The Rhone-aggregation land surface scheme intercomparison project: An overview // *J. Climate*. 2004. V. 17. P. 187–208.
18. Dirmeyer P., Gao X., Oki T. The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan // IGPO Publ. Series. Silver Spring: Int. GEWEX Project Office, 2002. № 37. 75 p.
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. 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. 2015 www.hydrol-earth-syst-sci.net/19/2737/2015/.
21. 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): InTech., 2011. P. 413–440.
22. Gusev E.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ya. Modeling River Runoff in Northwestern Russia with the Use of Land Surface Model SWAP and Global Databases // *Water Resour.* 2011. V. 38. № 5. P. 571–582.
23. Gusev Ye.M., Nasonova O.N., Dzhogan L.Ya., Kovalev E.E. Scenario forecasting changes in the water balance components of the Olenek and Iindigirka river basins due to possible climate change // *Proc. IAHS*. 2015. № 371. P. 13–15.
24. Kanae S., Nishio K., Oki T., Musiak K. Hydrograph estimations by flow routing modeling from AGCM output in major basins of the world // *Ann. J. Hydraulic Eng.* 1995. V. 39. P. 97–102.
25. Liang X., Lettenmaier D.P., Wood E.F., Burges S.J. A Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99 (D7). P. 14415–14428.
26. Lohmann D., Lettenmaier D.P., Liang X., Wood E.F., Boone A., Chang S., Chen F., Dai Y., Desborough C., Dickinson R.E., Duan Q., Ek M., Gusev Ye.M., Habets F., Irannejad P., Koster R., Mitchell K.E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Schlosser A., Shao Y., Shmakin A.B., Verseghy D., Warrach K., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., Zeng Q. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase-2(c) Red-Arkansas River basin experiment: 3. Spatial and temporal analysis of water fluxes // *Global and Planetary Change*. 1998. V. 19. № 1–4. P. 161–179.
27. 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.
28. Oki T. Validating the runoff from LSP-SVAT models using a global river routing network by one degree mesh // *Proc. 13th Conf. on Hydrology*. N. Y.: Amer. Met. Soc., 1997. P. 319–322.
29. 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.
30. Su F., Adam J.C., Bowling L.C., Lettenmaier D.P. Streamflow simulations of the terrestrial Arctic domain // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. D08112.
31. Wu H., Kimball J.S., Li H., Huang M., Leung L.R., Adler R.F. A new global river network database for macroscale hydrologic modeling // *Water Resour. Res.* 2012. V. 48. № 9. W09701.
32. 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.

PHYSICAL-MATHEMATICAL MODELING OF MULTIYEAR DYNAMICS OF WATER-BALANCE AND SNOW-RESERVE COMPONENTS IN OB-IRTYSH RIVER BASIN

© 2019 E. M. Gusev^{1,*}, O. N. Nasonova¹, E. A. Shurkhno¹,
L. Ya. Dzhogan¹, G. V. Ayzel¹

¹*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences*

Russia 119333 Moscow

**e-mail: sowaso@yandex.ru*

Received: 07.05.2016

Revised version received: 16.06.2016

Accepted: 29.09.2017

The possibility of use of the previously developed calculation technique of the North Rivers flow hydraulic records for the Ob River, the largest river in Russia by basin area, flowing under severe conditions in West Siberia was examined. The calculation technique is based on the model of heat and moisture exchange of the geological substrate with the Earth's atmosphere, the Soil–Water–Atmosphere–Plants (SWAP) model, in conjunction with information support based on global databases of geological-substrate parameters and information obtained from observational data collected by weather stations within the Ob River basin. Uncertainty of the Ob River flow was assessed. Additionally, the ability of the SWAP model to reproduce multiyear dynamics from average values of snow reserves in the Ob-Irtysh basin was examined.

Keywords: river flow hydraulic records, formation of snow cover, water-balance components, physical-mathematical modeling, global databases, Ob-Irtysh River basin.

DOI: 10.31857/S0321-0596464347-358