

нием данных измерений геостационарных метеорологических спутников //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. № 3. С.53-65.

4. Zoya Startseva, Eugene Muzylev, Elena Volkova, Alexander Uspensky, Sergey Uspensky. Water and heat regimes modelling for a vast territory using remote-sensing data// International Journal of Remote Sensing. 2014. V.35. N 15. P. 5775-5799.

5. Волкова Е.В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9,10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т.11. № 4. С. 163-177.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ОЦЕНКАХ КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ СТОКА СЕВЕРНЫХ РЕК РОССИИ¹⁰

Насонова О.Н.¹, Гусев Е.М.¹, Володин Е.М.², Ковалев Е.Э.¹

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва

²Институт вычислительной математики РАН, г. Москва
nasonova@aqua.laser.ru

На современном этапе для оценки влияния возможного изменения климата на речной сток наибольшее распространение получил подход, основанный на использовании гидрологических моделей и результатов расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы и океана (AOGCMs: Atmosphere-Ocean Global Climate Models). Последние являются основным инструментом для получения физически обоснованных сценариев изменения климата, в свою очередь основанных на сценариях эмиссии парниковых газов в атмосферу. С помощью AOGCMs рассчитывается соответствующая заданным сценариям динамика метеорологических элементов в XXI веке, значения которых используются затем в гидрологических моделях для получения прогностических сценариев изменения гидрологических характеристик. Если пространственное разрешение расчетной сетки климатических моделей оказывается более грубым по сравнению с

¹⁰Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00027).

масштабом гидрологических объектов, осуществляется приведение полей метеорологических элементов посредством процедуры статистического или динамического даунскейлинга для устранения несоответствия масштабов. Кроме того, для устранения систематических ошибок в рассчитанных метеорологических характеристиках осуществляется корректировка их значений или используется ансамблевый подход. Очевидно, что конечный продукт – гидрологические прогнозы будет содержать неопределенности, связанные с каждым из указанных этапов.

В данной работе рассматриваются неопределенности в оценках изменения речного стока ряда северных рек России, связанные с применением различных сценариев, моделей и методов, в том числе: сценариев эмиссии парниковых газов в атмосферу – RCP8.5 и RCP4.5, использованные при подготовке 5-го оценочного доклада IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change); различных моделей – AOGCM INMCM4.0 (Institute of Numerical Mathematic Climate Model, version 4.0) и LSM SWAP (Land Surface Model Soil Water – Atmosphere – Plants); разных методов корректировки прогностических метеорологических полей, рассчитанных по модели AOGCM INMCM4.0.

Глобальная климатическая модель AOGCM INMCM4.0, разработанная в Институте вычислительной математики РАН, состоит из двух основных блоков – моделей общей циркуляции атмосферы (с пространственным разрешением по долготе и широте $2^\circ \times 1.5^\circ$) и общей циркуляции океана (с разрешением $1^\circ \times 0.5^\circ$) [1]. LSM SWAP – физико-математическая модель взаимодействия подстилающей поверхности суши с атмосферой с распределенными параметрами [2-4]. Обе модели, наряду с другими гидрометеорологическими переменными, воспроизводят сток в каждой расчетной ячейке. Для получения стока в замыкающем створе авторами использована модель трансформации стока в речной сети (RRM: River Routing Model).

Настоящая работа выполнена на примере бассейнов двух рек Панарктического региона – Северной Двины и Колымы, расположенных в разных физико-географических условиях.

Северная Двина находится на севере Европейской части России. Для территории бассейна (площадью $357\,000\text{ км}^2$) характерны избыточное увлажнение (среднегодовое количество осадков изменяется от 650 мм на севере до 800 мм на юге-западе при сред-

негодовом потенциальном испарении ~ 400-500 мм). Среднемноголетний слой стока в замыкающем створе составляет около 310 мм/год.

Бассейн р. Колымы площадью 644 000 км² расположен в северо-восточной части Сибири; его характерными чертами являются экстремально низкие зимние температуры воздуха и наличие многолетней мерзлоты. Среднемноголетние годовые суммы осадков возрастают к югу от 150 мм до 250-300 мм. Среднемноголетний слой стока в замыкающем створе составляет около 190 мм/год.

Для модельных расчетов бассейн р. Северной Двины (до стоковой станции Усть-Пинега) был схематизирован в виде совокупности 62 ячеек с пространственным разрешением 1°×1° [5], а бассейн р. Колымы (до стоковой станции Колымская) – в виде 101 ячейки [6]. Для каждой расчетной ячейки были получены трехчасовые значения метеорологических элементов (включающих в себя осадки, приходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, температуру и влажность воздуха, атмосферное давление и скорость ветра) на основе расчетов по модели INMCM4.0 для исторического периода (1971-2005 гг.) и двух прогностических периодов (2026-2045 гг. и 2081-2100 гг.). Прогностические расчеты проводились для двух различных сценариев эмиссии парниковых газов в атмосферу: RCP8.5 (высокая эмиссия при отсутствии мер по ограничению выбросов парниковых газов в атмосферу) и RCP4.5 (умеренная эмиссия при умеренных ограничениях). Значения метеорологических полей использовались в качестве входной информации для расчетов речного стока по модели SWAP.

Необходимые для расчетов априорные значения модельных параметров были получены на основе одноградусных глобальных баз данных, подготовленных в рамках международного проекта GSWP-2 (Global Soil Wetness Project, phase 2) [7]. Для улучшения качества расчетов осуществлялась оптимизация ряда параметров с использованием суточных значений измеренного стока в замыкающих створах обеих рек. Оптимизация проводилась на основе автоматизированного алгоритма поиска глобального оптимума целевой функции SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method, Университет Аризоны) [8]. В качестве целевой функции использовалась эффективность расчета NS суточного стока по Нэшу-Сатклифу [9]. При этом поиск максимума целевой функции проводился при условии, что систематическая ошибка расчета стока находится в пределах 5%.

Восемь модельных параметров были откалиброваны с использованием «реальной метеорологии» (данных наблюдений метеорологических станций) [10]. Полученный при этом набор оптимальных значений параметров назовем OPRM-8.

Помимо этого, для уменьшения возможных систематических ошибок в метеорологических полях были введены четыре корректирующих множителя к наиболее важным метеорологическим элементам (жидким и твердым осадкам и приходящим потокам радиации), которые калибровались одновременно с параметрами подстилающей поверхности. В этом случае калибровалось 11 параметров, поэтому полученный набор их оптимальных значений назовем OPRM-11.

Следует подчеркнуть, что указанные два набора оптимальных значений параметров были получены для «реальной метеорологии». Для их использования в расчетах по данным AOGCM INMCM4.0 последние необходимо привести в соответствие с указанной метеорологией, т.е. устранить систематические ошибки, неизбежно возникающие при расчетах по глобальным климатическим моделям. Это было сделано тремя способами.

Первые два способа представляли собой гибридизацию рассчитанных метеорологических полей с измеренными. При этом в рассчитанные значения метеорологических элементов были введены поправочные множители. В первом случае они определялись как отношения измеренных значений, осредненных по каждому бассейну и за весь расчетный период, к рассчитанным с помощью INMCM4.0 значениям. Откорректированные таким образом метеорологические поля назовем COR1. Во втором случае корректирующие множители для всех метеорологических элементов (за исключением коротковолновой радиации) представляли собой отношения среднемесячных измеренных значений к соответствующим рассчитанным по INMCM4.0. Для коротковолновой радиации при расчете корректирующих множителей принимался во внимание суточный ход радиации. Гибридизированные таким образом трехчасовые метеорологические поля назовем COR2. Отметим, что второй подход был описан и реализован в [11].

Наконец, третий подход состоял в перекалибровке модели SWAP с использованием метеорологических полей, рассчитанных по INMCM4.0 для современного периода. При этом калибровалось 11 параметров и было получено два набора их оптимальных значе-

ний: OPGM-11 и OPHM-11. Первый соответствует нескорректированным, а второй – гибридным (вторым способом) метеорологическим полям.

Все полученные наборы оптимальных параметров были использованы для расчетов гидрографов речного стока обеих рек с помощью модели SWAP. Прежде всего, следует остановиться на историческом периоде и сопоставить рассчитанные гидрографы с данными соответствующих измерений стока в замыкающем створе каждой реки. Результаты сопоставления обобщены в табл. 1, где наряду с расчетами по модели SWAP, приведены результаты расчета стока по INMCM4.0.

Таблица 1 – Статистические характеристики соответствия измеренных (x_{sim}) и рассчитанных (x_{obs}) гидрографов стока рек Северной Двины и Колымы на основе моделей SWAP и INMCM4.0

Статистические характеристики	INMCM 4.0	SWAP					
		OPRM-8	OPGM-11	COR1, OPRM-8	COR2, OPRM-8	COR2, OPRM-11	COR2, OPHM-11
р. Северная Двина (1972-2003)							
x_{sim} , мм/год	284	344	294	275	266	272	284
x_{sim}/x_{obs}	0.97	1.17	1.00	0.94	0.90	0.93	0.97
<i>Bias</i> , %	-3.8	16.8	0.1	-6.4	-9.9	-7.8	-3.6
<i>NS</i>	0.70	0.60	0.77	0.73	0.63	0.68	0.73
р. Колыма (1978-1998)							
x_{sim} , мм/год	371	370	200	197	166	165	196
x_{sim}/x_{obs}	1.92	1.92	1.04	1.02	0.86	0.85	1.02
<i>Bias</i> , %	92.0	92.0	3.5	2.2	-14.0	-14.8	1.5
<i>NS</i> *	-0.20	-0.46	0.64	0.63	0.57	0.57	0.62

*Эффективность *NS* рассчитана для месячных значений стока.

Как следует из табл. 1, калибровка параметров модели SWAP (с различными наборами оптимальных значений параметров и различными способами корректировки систематических ошибок в исходных метеорологических полях) совместно с четырьмя поправочными множителями к метеорологическим элементам (см. OPGM-11 в табл. 1) привела к наилучшим результатам для обеих рек. Результаты расчета стока по INMCM4.0 можно признать вполне удовлетворительными для р. Северной Двины и неудовлетворительными для р. Колымы. Последнее, главным образом, связано с низким ка-

чеством воспроизведения климатической моделью осадков для бассейна р. Колымы, превысившим результаты измерений на 90%.

Сценарные прогнозы речного стока были получены для двух вышеуказанных сценариев (RCP4.5 и RCP8.5) и для двух периодов: (a) 2026-2045 и (b) 2081-2100. Для удобства обозначим их как 45a и 45b, 85a и 85b. В табл. 2 обобщены прогнозируемые относительные изменения годового речного стока (нормированные на среднегодовые значения измеренного годового стока за современный период), рассчитанные по моделям INMCM4.0 и SWAP (с различными наборами оптимальных значений параметров и различными способами корректировки систематических ошибок в прогностических метеорологических полях).

Таблица 2 – Относительные изменения годового слоя стока (%) рек Северной Двины и Колымы, полученные по моделям SWAP и INMCM4.0 для различных климатических сценариев и периодов

Сценарий	INMCM		SWAP				Среднее	Min*	Max*	Δ=max-min
	4.0	OPGM-11	COR1, OPRM-8	COR2, OPRM-8	COR2, OPRM-11	COR2, OPRM-11				
р. Северная Двина										
45a	0.6	1.1	-0.3	1.6	0.6	1.6	0.9	-0.3	1.6	1.9
45b	8.5	18.2	14.3	17.3	13.4	17.9	16.2	13.4	18.2	4.8
85a	4.0	10.0	8.3	9.8	8.1	10.3	9.3	8.1	10.3	2.2
85b	10.6	26.3	20.4	24.0	19.0	27.2	23.4	19.0	27.2	8.2
р. Колыма										
45a	-	1.4	2.8	3.9	5.8	5.4	3.9	1.4	5.8	4.4
45b	-	13.9	13.5	15.1	19.3	17.9	15.9	13.5	19.3	5.8
85a	-	-0.1	0.1	0.7	2.2	1.3	0.8	-0.1	2.2	2.3
85b	-	25.6	25.7	25.4	30	31.7	27.7	25.4	31.7	6.3

*Среднее, минимальное и максимальное значения приведены для расчетов по SWAP.

С применением модели SWAP получено пять вариантов расчета стока для каждого климатического сценария и прогностического периода. Различия между этими вариантами иллюстрируют неопределенности в прогностических оценках стока, связанные с применением того или иного способа корректировки исходных метеорологических полей. Как следует из табл. 2, указанные различия невелики – для р. Колымы они составляют от 2.3 до 6.3% в зависимости от сценария, а для р. Северной Двины – от 1.9 до 8.2%. Различия между моделями немного больше: в среднем SWAP прогнозирует

увеличение стока р. Северной Двины для сценариев 45a, 85a, 45b и 85b соответственно на 0.3, 5.3, 7.7 и 12.8% выше по сравнению с INMCM4.0.

На основе результатов, приведенных в табл. 2, можно также получить представление о неопределенностях в оценках стока, связанных с выбранным климатическим сценарием (путём сопоставления 45a с 85a и 45b с 85b). Для р. Северной Двины в 2026-2045 гг., в соответствии с расчетами по INMCM4.0, можно ожидать увеличения годового стока на 0.6% или 4%, соответственно при умеренной и высокой эмиссии парниковых газов. Аналогичные оценки по SWAP (осредненные по 5 вариантам расчета) составляют 0.9% (варьируя от -0.3% до 1.6%) и 9.3% (изменяясь от 8.1% до 10.3%). Для следующего прогностического периода 2081-2100 гг. увеличение годового стока (по сравнению с современным периодом) по INMCM4.0 составит 8.5% или 10.6% соответственно при умеренной и высокой эмиссии парниковых газов, по SWAP – в среднем 16.2% (изменяясь от 13.4% до 18.2%) и 23.4% (варьируя от 19.0 до 27.2%).

Литература

1. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM 4.0 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 1–17.
2. Gusev Ye. M., Nasonova O. N. Modelling heat and water exchange in the boreal spruce forest by the land-surface model SWAP // J. Hydrology. 2003. V. 280. № 1-4. P. 162-191.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование процессов тепло-влагообмена суши с атмосферой в локальном масштабе для территорий с многолетней мерзлотой // Почвоведение. 2004. №9. С. 1077-1092.
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., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э. Моделирование стока р. Северной Двины с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP и глобальных баз данных // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 439-453.
6. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Физико-математическое моделирование многолетней динамики суточных значений речного стока и снегозапасов в бассейне р. Колымы // Водные ре-

сурсы. 2015. (в печати)

7. *Dirmeyer P., Gao X., Oki T.* The Second Global Soil Wetness Project. Science and Implementation Plan // IGPO Publication Series, Silver Spring: International GEWEX Project Office. 2002. N 37. P. 1-75.

8. *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.

9. *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.

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 // *Водные ресурсы.* 2008. Т. 35. № 2. С. 181-195

11. *Zhao M., Dirmeyer P.* Production and Analysis of GSWP-2 near-surface meteorology data sets // *COLA Techn. Rep.* 2003. № 159. P. 1-38.

РОЛЬ НОВОСИБИРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В РЕГУЛИРОВАНИИ СТОКА ВЕРХНЕЙ ОБИ И ФОРМИРОВАНИИ КАЧЕСТВА ВОДЫ¹¹

Савкин В.М., Двуреченская С.Я.

Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Новосибирский филиал, г. Новосибирск
savkin@iwep.nsc.ru, dvur@iwep.nsc.ru

Проблемы удовлетворения потребностей населения и отраслей экономики крупных регионов пресной водой, обусловленные внутригодовой неравномерностью речного стока, могут быть решены путём регулирования стока и созданием крупных водохранилищ, что является одной из основных задач современной водохозяйственной науки. Актуальность проблемы связана с тем, что в России регулирование стока рек находится на уровне Китая и Индии, отстает от США и Канады; в то время как в РФ за 3 месяца весеннего половодья формируется 60% водных ресурсов рек, в Китае – 48%,

¹¹Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-05-00937).