

## Литература

1. *Мотовилов Ю.Г.* Моделирование снежного покрова и снеготаяние // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов / под ред. Кучмента Л.С., Музылева Е.Л. Изд. НГК РАН, 1993. С. 9-37.
2. *Попов Е.Г.* Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. М.: Гидрометеозда. 1963. 395 с.
3. *Кулик В.Я.* Инфильтрация воды в почву.– М.: Колос, 1978, 93 с.
4. *Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н.* Пространственная модель формирования тало-дождевого стока горной реки (на примере Верхней Кубани)// Метеорология и гидрология, 2010, № 12, с. 76-87.
5. *Калюжный И.Л., Лавров С.А.* Гидрофизические процессы на водосборе. – Санкт-Петербург: Нестор-История, 2012, 616 с.
6. *Иванов Н.С.* Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах. – М.: Наука. 1969, 240 с.

## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРОГНОЗА СТОКА РЕК РОССИИ И МИРА В XXI ВЕКЕ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО АНТРОПОГЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Добровольский С.Г.  
Институт водных проблем РАН, Москва,  
sgdo@bk.ru

Основным методом сверхдолгосрочного прогноза изменений стока рек в настоящее время являются расчеты на численных моделях общей циркуляции атмосферы, соединенных с моделями океана, покровного оледенения и поверхности суши (МОЦАО или кратко КМ – климатические модели). Вместе с тем, современные КМ воспроизводят речной сток с заметными, зачастую большими ошибками. Существенными источниками неопределенности оценок изменений стока на протяжении XXI века являются следующие.

- Различия между имеющимися сценариями эмиссии парниковых газов в атмосферу.
- Различия между результатами моделирования климатической системы (в том числе речного стока) на различных КМ.
- Неопределенность в оценке среднего стока рек за «реперный»

период наблюдений (вследствие естественной межгодовой изменчивости), сравниваемого с оценками стока для будущих моментов времени.

– Неопределенность в оценках стока, полученных на КМ для будущих моментов времени, возникающая за счет межгодовой изменчивости стока внутри самих моделей, а также длинопериодной нестационарности реализаций стока в моделях.

Задачей настоящего исследования была количественная оценка возможно большего числа неопределенностей расчетных величин стока на протяжении XXI века как для рек в глобальном масштабе (в терминах слоя стока), так и для важнейших российских рек – в виде хронологических графиков величин стока в ближайших к устью створах.

На первом этапе исследований была проведена работа по тестированию возможностей КМ воспроизводить реальные величины среднегодового, максимального и минимального стока за периоды имеющихся наблюдений. С этой целью были использованы результаты «исторических» экспериментов на 37 моделях проекта CMIP-5 (Coupled Model Intercomparison Project. Phase 5) [1]. Анализ показал, что наилучшие результаты, при моделировании стока разных рек, дают различные модели проекта. То есть, не существует одной модели или какой-то ее модификации, которая наилучшим образом описывала бы сток всех рассматриваемых рек России. Так, лучшее описание наиболее важного параметра – среднего многолетнего стока – для Волги дает модель MPI-ESM1, для Северной Двины – MPI-ESM-P, для Оби, как было сказано, – FGOALS-G2, для Енисея – MRI-ESM1, для Лены – INMCM4, для Амура – GFDL-ESM2G. Таким образом, как отмечалось, например, в [2] и других работах, наилучшие или обобщающие результаты описания речного стока следует ожидать, если модельные характеристики усреднить или рассмотреть медианы распределения по всем участвовавшим в проекте CMIP-5 моделям.

В табл. 1 приведены результаты сравнения моделированных (осредненных по 37 моделям и рассчитанных по каждой модели) параметров стока 6 рек России и его изменений. При этом использовались следующие обозначения:  $M$  – средняя величина;  $\Delta$  – разность между оценкой по данным моделей и по данным наблюдений;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;  $C_V$  – коэффициент вариации;  $r_1$  – коррелированность между смежными значениями ряда;  $P$  – порядок процесса авторег-

рессии;  $I_{SM}$  – индекс стационарности по среднему (математическое ожидание). Нижний индекс «набл» обозначает величины, рассчитанные по данным наблюдений, «мод» - по данным моделей. Выражение « $\sigma(\ )$ » обозначает процедуру расчета размаха оценок соответствующего параметра (в среднеквадратичном) по 37 моделям, в следующей строке – та же величина, в процентах от среднего значения параметра по моделям. Размерность величин с индексом <sup>1</sup> – м<sup>3</sup>/с; остальные величины – безразмерные или в %.

Таблица 1 – Параметры наблюдаемых и моделированных рядов годового стока основных рек России

Параметр	Волга	Сев. Двина	Обь	Енисей	Лена	Амур
$M_{набл}^1$	8136	3336	12617	18368	16697	9981
$M_{мод}^1$	8215	2731	12205	14401	14097	12608
$\Delta M, \%$	1	-18	-3	-21	-16	26
$\sigma(M_{мод})^1$	2901	762	3893	5254	5323	4234
$\sigma(M_{мод}), \%$	35	28	32	36	38	34
$\sigma_{набл}^1$	1442	624	1894	1481	2033	2017
$\sigma_{мод}^1$	1505	508	1911	1543	1792	2335
$\Delta \sigma, \%$	4	-19	1	4	-12	16
$\sigma(\sigma_{мод})^1$	426	128	641	530	552	725
$\sigma(\sigma_{мод}), \%$	28	25	34	34	31	31
$C_V_{набл}$	0,18	0,19	0,15	0,08	0,12	0,20
$C_V_{мод}$	0,20	0,19	0,16	0,11	0,14	0,19
$\Delta C_V, \%$	13	0	7	36	15	-6
$\sigma(C_V_{мод})$	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04
$\sigma(C_V_{мод}), \%^5$	30	21	31	27	29	21
$r_1_{набл}$	0,35	-0,01	0,46	0,20	0,28	0,45
$r_1_{мод}$	0,23	0,15	0,17	0,19	0,16	0,16
$\Delta r_1, \%$	-35	1600	-63	-6	-42	-64
$\sigma(r_1_{мод})$	0,20	0,16	0,17	0,16	0,16	0,14
$\sigma(r_1_{мод}), \%$	87	107	100	84	100	88
$P_{набл}$	1	0	1	0	2	1
$P_{мод}$	0,57	0,29	0,46	0,51	0,46	0,29
$\Delta P, \%$	-43	-	-54	-	-77	-71
$\sigma(P_{мод})$	0,69	0,57	0,52	0,73	0,61	0,57
$\sigma(P_{мод}), \%$	160	197	113	143	133	197
$I_{SMнабл}$	-2,59	0,21	1,15	1,76	1,08	-0,75
$I_{SMмод}$	0,85	0,62	0,29	0,89	0,24	-0,06
$\Delta I_S, \%$	133	195	-75	-49	-48	92
$\sigma(I_{SMмод})$	1,41	1,19	1,27	1,36	1,03	1,04
$\sigma(I_{SMмод}), \%$	166	192	438	153	429	1733

Из табл. 1 видно, что сравнительно сносно осредненные по моделям величины оценивают лишь средний многолетний сток рек, стандарты и коэффициенты вариации годовых величин (средние по 6 рекам ошибки 13 – 14%). Структура изменений стока по времени – автокоррелированность, порядки авторегрессионных моделей, параметр стационарности ISM (о нем – см. в [3]) – описывается с чрезвычайно большими ошибками, измеряемыми десятками и сотнями процентов. С еще большими ошибками модели описывают все параметры максимально и минимального стока, включая средние многолетние значения этих видов стока (сток наиболее и наименее многоводного месяца). В связи с этим дальнейшие оценки и анализ в настоящей работе проводятся в отношении годовых величин стока.

На рис. 1 показаны оценки «индекса значимости», *ИЗ*, оценок возможных изменений годового слоя стока для конца первой четверти, середины, конца третьей четверти и конца XXI века. Введенный нами индекс значимости представляет собой частное от деления оценки изменения годового слоя стока на среднеквадратичную ошибку этой оценки, учитывающую определенным образом перечисленные выше неопределенности прогноза. В левой части рисунка помещены карты, построенные с использованием шести наиболее известных сценариев МГЭИК (см. отчет [4]), в правой части – в соответствии со сценарием эмиссии парниковых газов Московского энергетического института [5]. В обоих случаях пересчет климатологических прогнозов в прогнозы изменений слоя стока осуществлялся с использованием «гидрологического даунскейлинга» 21 модели МГЭИК [6]. Эти прогнозы трансформировались в другую пространственную сетку, сглаживались с целью устранения искусственной мозаичности, приспособлялись к различным климатическим сценариям и моментам времени, а также ошибки прогнозов рассчитывались в соответствии с процедурами, описанными в [7].

Из рис. 1 видно, что вплоть до конца первой четверти – первой трети 21 века почти на всей территории России не ожидается сколько-либо значимых изменений слоя годового стока вследствие парникового эффекта. Значительное увеличение стока фиксируется лишь во второй половине XXI века и только для крайних северо-восточных регионов России. (Эти суждения мы основывали преимущественно на сценарии МЭИ, представляющемся нам более адекватным по сравнению со сценариями МГЭИК).

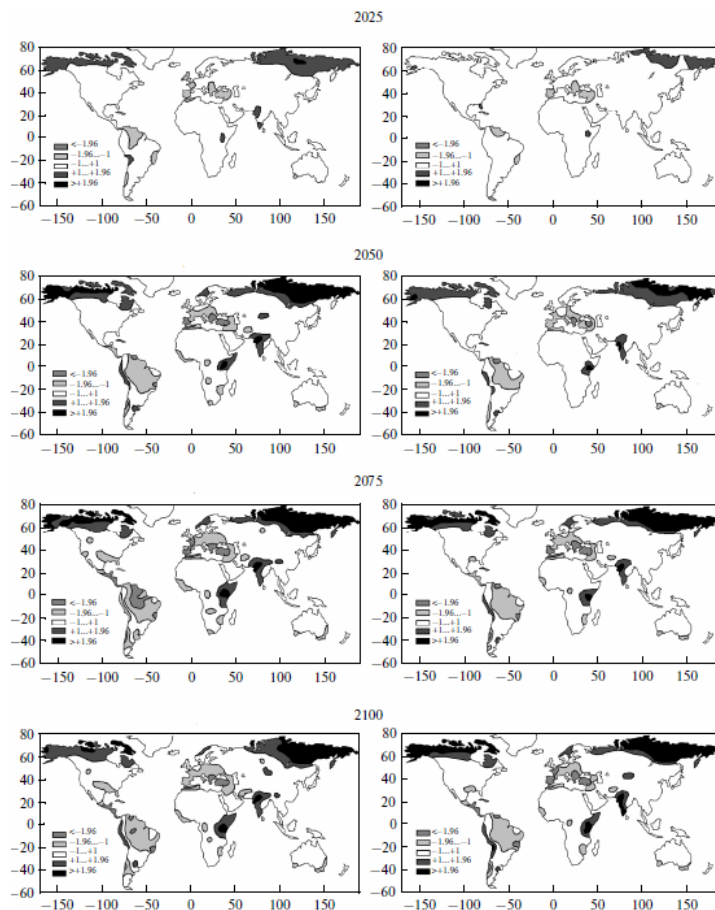


Рис. 1 – Индексы значимости (ИЗ) оценок изменений слоя стока.  
 Слева – с использованием 6-ти сценариев МГЭИК; справа – с использованием сценария МЭИ

Представляют интерес также оценки возможных изменений стока конкретных рек – прежде всего, в близких к устью створах (рис. 2). Здесь полоса светло-серого цвета обозначает оценку среднего значения годового стока в соответствии со сценариями МГЭИК плюс-минус среднеквадратичную ошибку этой оценки, темно-серая полоса обозначает наблюдаемый за реперный период (1961–1990 гг.) средний годовой сток плюс-минус среднеквадратичное значение ошибки этой оценки. Тонкие линии обозначают границы

указанных полос. Сплошная жирная линия обозначает оценку среднего годового стока в соответствии со сценарием МЭИ.

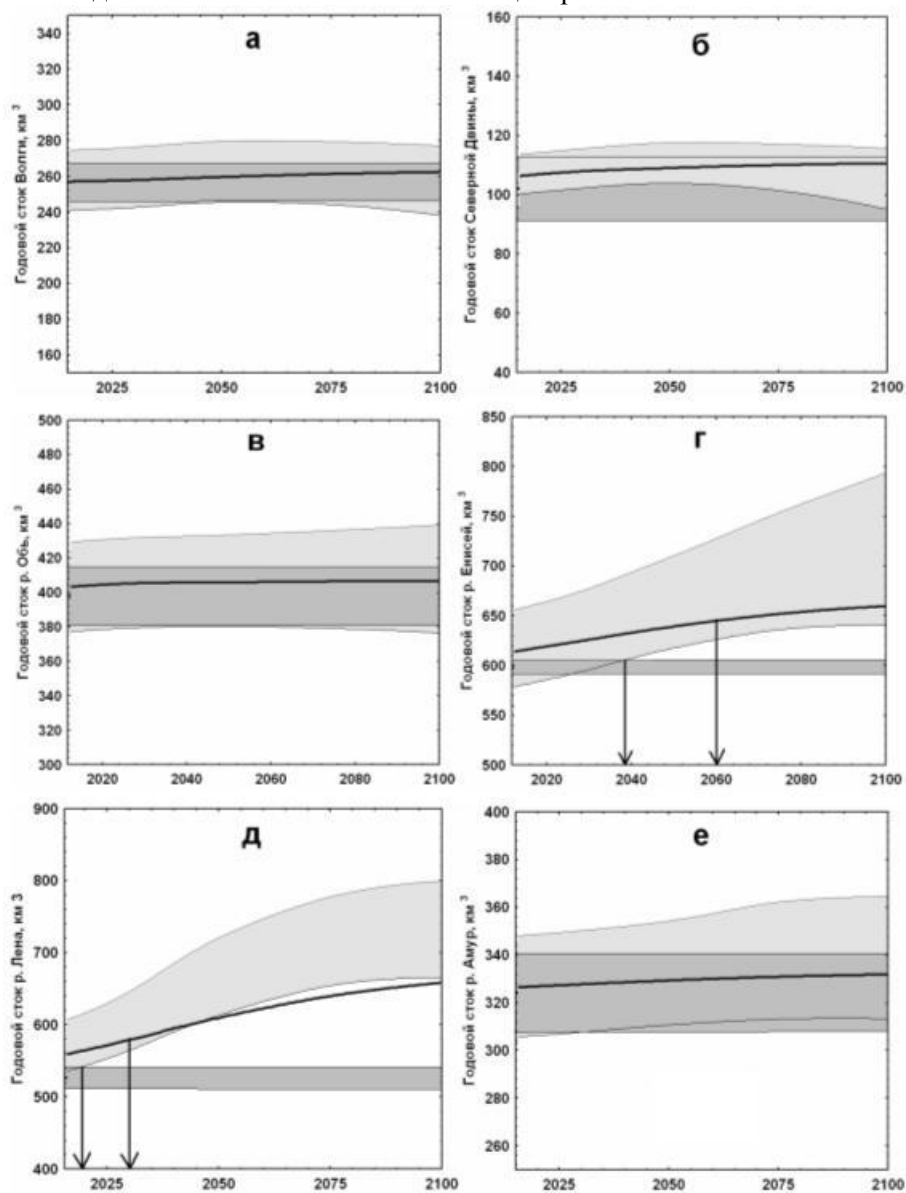


Рис. 2 – Оценки возможных изменений стока рек РФ в XXI веке: а– Волги, б – Северной Двины, в – Оби, г – Енисея, д – Лены, е –Амура.

Вертикальные стрелки на рис. 2 указывают моменты времени, когда «прогноз» стока и наблюдаемый сток расходятся в среднеквадратичных значениях соответствующих ошибок – если такое расхождение имеет место в XXI веке. При этом левая стрелка соответствует сценариям МГЭИК, правая – сценарию МЭИ.

Графики показывают, что для таких рек, как Волга, Северная Двина, Обь, Амур – статистически значимые изменения годового стока на всем протяжении XXI века не фиксируются при помощи рассмотренных выше подходов. Прогнозные «полосы» либо полностью включают полосы ошибок оценок наблюдаемого стока рек (Волга, Обь), либо в значительной степени перекрываются с последними (р. Северная Двина, р. Амур). Напротив, оценки стока рек Енисея и особенно Лены указывают на возможное значительное увеличение стока этих рек в предстоящие десятилетия – но, скорее всего, не ранее второй трети века.

#### Литература

1. WCRP Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5: Special Issue of the CLIVAR Exchanges Newsletter, 2014. No. 56, 15, No. 2. [http://www.clivar.org/publications/exchanges/Exchanges\\_56.pdf](http://www.clivar.org/publications/exchanges/Exchanges_56.pdf)
2. Nohara D., Kitoh A., Masahiro H., Oki T. Impact of climate change on river discharge projected by multimodel ensemble. // J. of Hydrometeorology, 2006, V. 7, 1076-1089.
3. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: Геос, 2011, 660 с.
4. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf)
5. Клименко В.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Мировая энергетика и климат планеты в XXI веке в контексте исторических тенденций // Российский химический журнал. 2008. Т. LII. № 6. С. 11-17.
6. Gosling S.N., Bretherton D., Haines K., Arnell N.W. Global hydrology modeling and uncertainty: running multiple ensembles with a campus grid // Philosophical Transactions of the Royal Society. A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Vol. 368, 4005-4021. [rsta.royalsocietypublishing.org](http://rsta.royalsocietypublishing.org) on November 6, 2013.
7. Dobrovolski S.G. Assessment of the statistical significance of global changes in the annual river runoff in XXI century due to possible anthropogenic warming of climate // Water Resources, 2014. Vol. 41. No. 6, 728-737.