

mates for small basins: Evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer, USA// Water Resources Research, 2010, №46.

3. https://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec12/GSTM_2003.PDF

4. <http://grace.jpl.nasa.gov/data/gracemonthlymassgridsland/>

5. Кислов А.В., Китаев Л.М., Константинов И.С. Статистическая структура крупномасштабных особенностей полей снежного покрова//Метеорология и Гидрология, 2001, №8, С 98-104

6. Жаков С.И. Общие закономерности режима тепла и увлажнения на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 231 с.

7. Национальный Атлас России. Т. 2. Природа. Экология. – М.: Роскартография, 2007. 495 с.

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ РАСЧЕТОВ И ПРОГНОЗОВ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ, ВЫЗВАННАЯ КЛИМАТИЧЕСКИМ ШУМОМ⁷

Гусев Е.М.¹, Насонова О.Н.¹, Ковалев Е.Э.¹, Семенов В.А.²

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва,

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва,

²Институт географии РАН, г. Москва

sowaso@yandex.ru

Тематика, связанная с долговременными оценками влияния климатических изменений на геофизические, экологические и другие процессы, определяющие многолетние изменения природных условий в разных частях планеты, стала особенно актуальной в настоящее время, что объясняется отмеченными во многих публикациях, в том числе отчетах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), возможными изменениями климата. Увеличилось также число работ, посвященных влиянию указанных изменений на формирование гидрологического цикла суши. Вместе с тем, полученные в разных работах оценки гидрологических последствий, вызванных изменением климата, характеризуются значительным разбросом – неопределенностью, обусловленной как субъективными, так объективными причинами.

⁷Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-05-00027).

Субъективные неопределенности, в частности, ошибки прогнозов изменения составляющих гидрологического цикла и водных ресурсов суши, связанные с неопределенностью социально-экономических сценариев эволюции общества, несовершенством глобальных объединенных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) и др., со временем могут быть уменьшены путем уточнения описания соответствующих процессов и сценариев, а также повышения качества их информационного обеспечения. Однако имеется объективная неопределенность, которая не зависит от уточнений и является внутренним свойством системы «атмосфера – гидросфера – суша». Эта неопределенность обусловлена хаотическим характером атмосферных процессов (так называемым «климатическим шумом»), а также их неустойчивостью по отношению к малым ошибкам в задании начальных условий при расчете эволюции метеорологических характеристик.

Климатический шум в силу своей объективности в структуре климатической системы определяет нижний предельный уровень неопределенности метеорологических характеристик, который можно достичь при их моделировании в климатических моделях [1]. Очевидно, что в силу влияния на гидрологические процессы он определяет и нижний уровень неопределенности при оценке характеристик гидрологической системы. Исследование этого влияния (прежде всего климатического шума осадков) является предметом настоящей работы. Причина его появления – объективная неустойчивость по отношению к начальным условиям: малое изменение начального условия со временем приводит к достаточно большим изменениям динамики системы.

В качестве меры неопределенности Un той или иной положительно определенной геофизической характеристики X , имеющей случайную составляющую, в работе использован следующий показатель:

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

где $x_{0.975}$ и $x_{0.025}$ – квантили 97.5 %-ой и 2.5 %-ой обеспеченности величины X , $M(X)$ – ее математическое ожидание. Указанная характеристика представляет собой отношение диапазона, в который может с 95%-ой обеспеченностью попасть случайная величина, к ее среднему значению. Будем называть ее неопределенностью в отличие от величины $Un_{abs} = (x_{0.975} - x_{0.025})$, которую назовем абсолют-

ной неопределенностью X . Данную характеристику (в отличие от Un) можно использовать при любых значениях X .

Исследование указанных неопределенностей смоделированных характеристик гидрологической системы проведено на основе расчета составляющих водного баланса речных бассейнов с помощью модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP (Soil – Water Atmosphere – Plants) [2]. В качестве входных верхних граничных условий использовались результаты расчетов динамики метеорологических элементов, полученные на основе модели общей циркуляции атмосферы ЕСНАМ5, разработанной в Метеорологическом институте им. Макса Планка. При этом с помощью модели ЕСНАМ5 получено $N=45$ вариантов [3] начальных условий состояния атмосферы на 1 июля 1979 г., позволивших смоделировать климатический шум, провести анализ оценки неопределенности метеорологических характеристик (в первую очередь – осадков), а также вызванных ими неопределенностей рассчитанных гидрологических характеристик (речного стока и суммарного испарения с исследуемого бассейна). Расчеты указанных характеристик проводились на основе смоделированных значений составляющих водного баланса за период с 1980 по 2012 гг.; в результате получены оценки годовых и месячных величин осадков, речного стока и суммарного испарения для бассейнов рек Северной Двины, Лены и Индигирки, обусловленные климатическим шумом неопределенностей.

Неопределенность расчета осадков (напомним, что она обусловлена структурной неустойчивостью атмосферы по отношению к начальным условиям) проиллюстрирована на рис. 1, где в качестве примера показано изменение средних по бассейну р. Индигирки годовых сумм осадков P . Для этой переменной неопределенность Un оказалась равной 0.48, 0.31 и 0.47 для рек Северной Двины, Лены и Индигирки, соответственно.

Примеры решения главной задачи работы – оценке неопределенности гидрологических характеристик, вызванных климатическим шумом, показаны на рис. 2-4.

На рис. 2 показаны: линейные регрессии траекторий (тренды) годовых слоев стока R (осредненного по 45-ти экспериментам) и границы их неопределенностей U_{Ran} 95% обеспеченности для рек Северной Двины, Лены, Индигирки; ряды измеренных слоев стока; неопределенность Un годового стока оказалась равной 0.66, 0.35 и 0.43 для Северной Двины, Лены и Индигирки, соответственно.

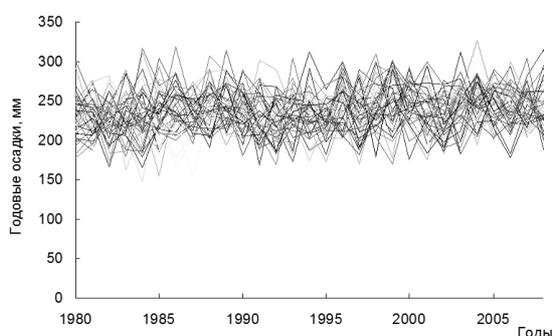


Рис. 1 – Динамика средних по бассейну р. Индигирки годовых осадков для 45-ти вариантов начальных метеорологических условий расчета эволюции метеорологических характеристик

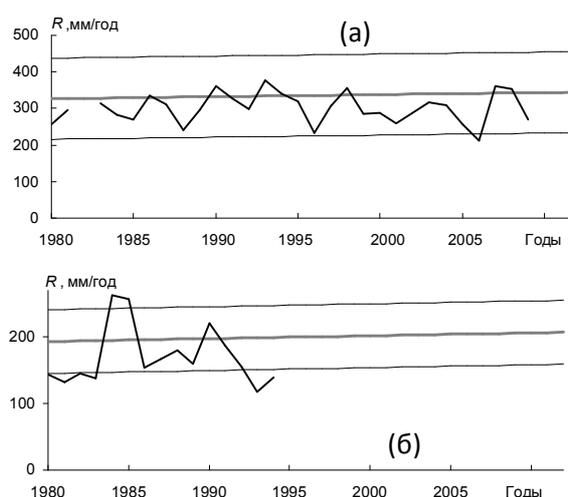


Рис.2 – Математическое ожидание годовых слоев стока $M(R)$ (серая линия), границы их абсолютных неопределенностей Un_{Rabs} 95%-ой обеспеченности (тонкие черные линии) и измеренные слои годового стока рек Северной Двины (а) и Индигирки (б) (черные жирные линии)

Как следует из рис. 2, измеренные ряды стока находятся, как правило, в пределах указанных диапазонов, однако иногда выходят за них. Последнее неудивительно, поскольку, во-первых, сами неопределенности также являются случайными величинами указанной обеспеченности; во-вторых, расчеты средних значений стока и

неопределенностей получены на основе смоделированных метеорологических полей, что неизбежно вносит систематическую ошибку.

На рис. 3 показан пример многолетнего тренда осредненных по функции распределения (близкой к нормальной, что подтверждено статистическим анализом) годовых слоев суммарного испарения $M(ET_{an})$ для бассейна р. Северной Двины, а также границы диапазона, в который с 95%-ой обеспеченностью могут попасть значения ET_{an} . Согласно расчетам, абсолютные значения неопределенности годового суммарного испарения Un с бассейнов рек Северной Двины, Лены и Индигирки оказались равными 0.75, 0.35 и 0.43 мм, соответственно. Следует отметить существенные отличия расчётных величин суммарного испарения, что объясняется разницей климатических условий в рассмотренных бассейнах (для рек Лены и Индигирки природные условия гораздо суровее).

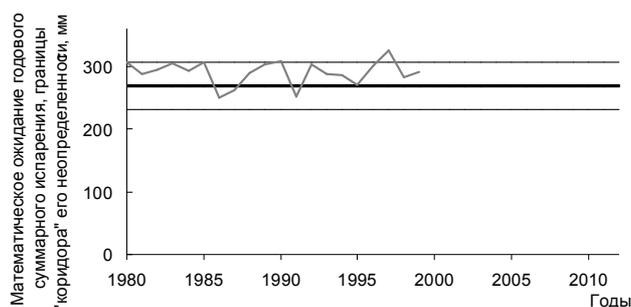


Рис. 3 – Пример многолетней эволюция математического ожидания слоя суммарного испарения $M(ET_{an})$ (черные жирные линии) с бассейна р. Северной Двины и диапазоны абсолютных значений их неопределенности $Un_{an,abs}$. (тонкие черные линии). Приведена также динамика испарения, рассчитанная для бассейна на основе данных наблюдений метеорологических станций (серая жирная линия)

Кроме оценок неопределенности основных составляющих водного баланса, представляет интерес анализ их спектральных плотностей $S(f)$, показывающих гармоники частот f , обладающих наибольшей интенсивностью при разложении временной эволюции соответствующей характеристики в ряд Фурье.

Рис. 4 иллюстрирует пример эволюции спектральных плотностей динамики осадков, стока и испарения для бассейна р. Лены. Представленные спектральные плотности отражают детерминированные и случайные составляющие во временной структуре гидрологического цикла. Так, у всех составляющих четко выражены пики

спектральных плотностей на частотах f , примерно равных $1/365 \text{ сут}^{-1}$ и $1/183 \text{ сут}^{-1}$, которые отражают большие амплитуды гармоник при разложении осадков в ряд Фурье с годовым и полугодовым периодами T ($T=1/f$), что в основном связано с детерминистической составляющей структуры осадков. В то же время по всему диапазону частот (начиная с высоких частот синоптических масштабов, соответствующих периодам 5-15 дней, и до частот, соответствующих периодам гармоник практически до года) наблюдаются значения $S(f)$, обусловленные климатическим шумом.

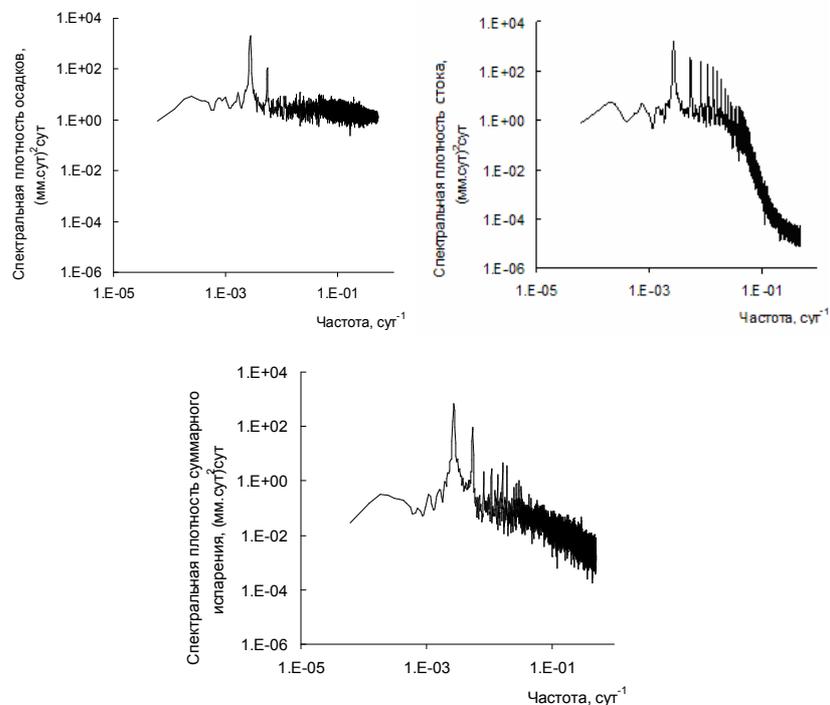


Рис. 4 – Спектральные плотности суточных значений осадков, стока и суммарного испарения для бассейна р. Лены

Нетрудно заметить, что $S(f)$ слоев стока отличаются от $S(f)$ осадков, выпадающих на территорию бассейна; из этого следует, что процессы, происходящие в речном бассейне, фильтруют влияние климатического шума. В частности, для спектральной плотности стока $S(f)$ осцилляции на высокочастотных гармониках (в диапазоне частот от 0.25 до 1.0 1/сут., что соответствует периодам от

1 -го до 10-15 суток) практически отсутствуют, в отличие от осциллирующих осадков. Обусловлено это тем, что на сток реки в замыкающем створе влияет трансформация стокообразования на разных участках территории бассейна во время стекания воды в пределах расчетных ячеек и речной сети.

Спектральные плотности суммарного испарения в значительно меньшей степени отличаются от $S(f)$ осадков, чем от $S(f)$ речного стока. Несколько уменьшается амплитуда высокочастотных гармоник, соответствующих частотам синоптического временного масштаба (10-15 суток), что связано с наличием некоторого буфера, немного сглаживающего высокочастотные осцилляции испарения, вызванные климатическим шумом. Летом таким буфером являются влагозапасы почвы, от которых в определенной степени зависит значение суммарного испарения (особенно транспирации), зимой – снежный покров, поддерживающий влажность воздуха у подстилающей поверхности на уровне насыщения.

Литература

1. Braun M., Caya D., Frigon A., Slivitzky, M. Internal variability of Canadian RCM's hydrological variables at the basin scale in Quebec and Labrador, J. Hydrometeorol. 2012. V. 13, p. 443–462.
2. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука. 2010. 328 с.
3. 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. Discuss., 12, p. 2305-2348, doi:10.5194/hessd-12-2305-2015, 2015.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТАЛОГО СТОКА РАВНИННОЙ РЕКИ (на примере реки Дон)

Демидов В.Н.

Институт водных проблем РАН, г. Москва

balber@mail.ru

Введение. Представлена физико-математическая модель формирования талого стока р. Дон до замыкающего створа с. Казанская