

СТАТИСТИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В РЯДАХ ГОДОВОГО СТОКА РЕК

И.В. Соломонова¹, канд. техн. наук

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

STATISTICAL HETEROGENEITIES IN THE TIME SERIES OF THE ANNUAL RIVER RUNOFF

I.V. Solomonova¹, Cand. Sc.

¹Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Рассматриваются вопросы неоднородности в многолетних колебаниях речного стока. Показано, что возможны ситуации, когда при практически неизменном математическом ожидании имеют место значительные изменения дисперсий.

The problems of heterogeneity in long-term fluctuations of the river runoff are considered. It is shown that situations are possible when with practically unchanged mathematical expectation significant changes in variances take place.

Введение.

Одним из инструментов оценки влияния климата на речные гидрологические системы является исследование изменений статистических характеристик многолетних колебаний речного стока. Обычно, при этих исследованиях, ограничиваются попытками выявления трендов в стоковых рядах, либо, что бывает реже, в выявлении неоднородности математических ожиданий для различных временных интервалов наблюдений за стоком (см., например, [1–3] и другие).

Однако нестационарность гидроклиматических процессов может проявляться и в моментах распределения более высокого порядка, нежели математическое ожидание – в дисперсии и коэффициенте автокорреляции. При этом возможны ситуации, когда при практически неизменном математическом ожидании имеют место значительные изменения дисперсий и коэффициентов автокорреляций. Поэтому, для более полной характеристики неоднородности стоковых рядов, анализ только средней величины представляется недостаточным. В исследованиях различных авторов отмечены несколько типов изменений в процессах по первым (математическое ожидание) и по вторым (дисперсия, коэффициенте автокорреляции) моментам распределения (см., например, [3–8]): среднее меняется, дисперсия не меняется; меняется и среднее и дисперсия; и самый редкий случай, меняется дисперсия при неизменном среднем.

Ситуация, когда *не* происходит изменение средних значений стока рек, но происходит изменение дисперсии (размаха колебаний) может оказывать негативное влияние на качество жизни человека, например, создавая проблемы, связанные с наводнениями, или, наоборот, с дефицитом воды. Поэтому, выявление неоднородностей не только по первым, но и по вторым моментам, позволит получить более обоснованное представление о реакции многолетних колебаний речного стока на климатические изменения в речном бассейне.

Материалы и методы.

Проанализированы многолетние ряды годовых величин речного стока Австралии (1), Венгрии (2), Великобритании (1), Германии (17), Канады (3), Китая (2), Нидерландов (1), Норвегии (2), России (12), Румынии (3), США (14), Финляндии (1), Франции (2), Чехии (2), Швеции (1), с продолжительностью наблюдений более 100 лет. Всего 64 поста наблюдений.

Реакция стока на изменения климата на водосборе выражается в неоднородности соответствующих рядов наблюдений. Такая зависимость может быть выявлена только для достаточно длительных интервалов времени, необходимых для получения относительно надежных оценок статистических характеристик исследуемых процессов.

Всемирная метеорологическая организация в качестве периодов, характеризующихся относительной стационарностью климатических условий, рекомендует использовать не менее чем 30-летние интервалы. Для большей надежности оценок моментов распределения стока, нами были разделены ряды наблюдений на две примерно равные части, с продолжительностью наблюдения в каждом интервале не менее 50 лет. Для этих интервалов получены средние значения, дисперсии и коэффициенты автокорреляции. Для оценки статистической значимости

различия в средних значениях и дисперсии использовались тесты Манна-Уитни и Фишера соответственно с уровнем значимости $p=0.05$. Нормальность распределения данных по стоку оценивалась в соответствии с тестом Шапиро-Уилка.

Результаты.

Проведенный нами анализ данных многолетнего стока на 64 створах рек мира (Европы, России, Северной Америки и Австралии) показал, что почти в половине рассмотренных случаев (29 случаев из 64) обнаружены относительно длительные интервалы времени (в основном 50 и более лет), характеризующиеся существенным различием дисперсий многолетнего стока (на 30-60%) (рис. 1). При этом математические ожидания (средние значения) стока практически не менялись. В некоторых случаях заметно отличается и автокорреляция.

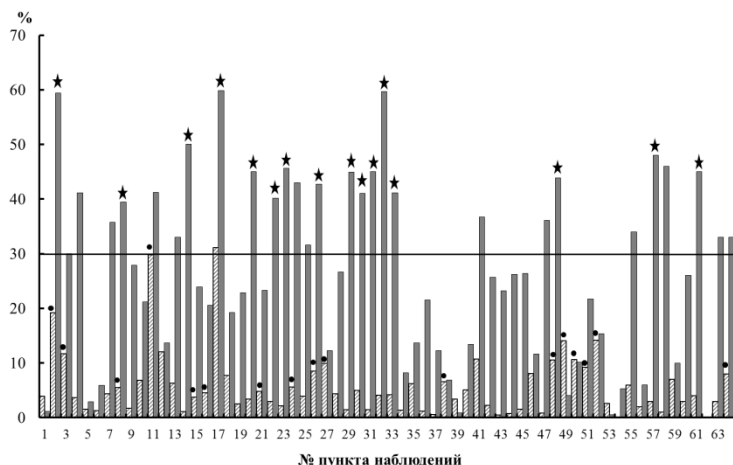


Рис. 1. Изменение средних значений (заштрихованный столбец) и дисперсий (серый) в рядах годового стока рек от одного интервала к другому. Линия – отметка порога в 30%, звездочка – дисперсии отличаются с вероятностью 95% (Фишер), точки – средние отличаются с вероятностью 95% (Манн-Уитни).

Более чем в половине случаев (в 17 из 29) тест Фишера показал, что различия в дисперсиях двух отрезков ряда реальные (рис. 2), при этом только в 4 случаях из 29 средние двух отрезков ряда отличаются (по Манну-Уитни). Различия в дисперсиях не зависят от близости распределения стока к нормальному распределению (рис. 2).

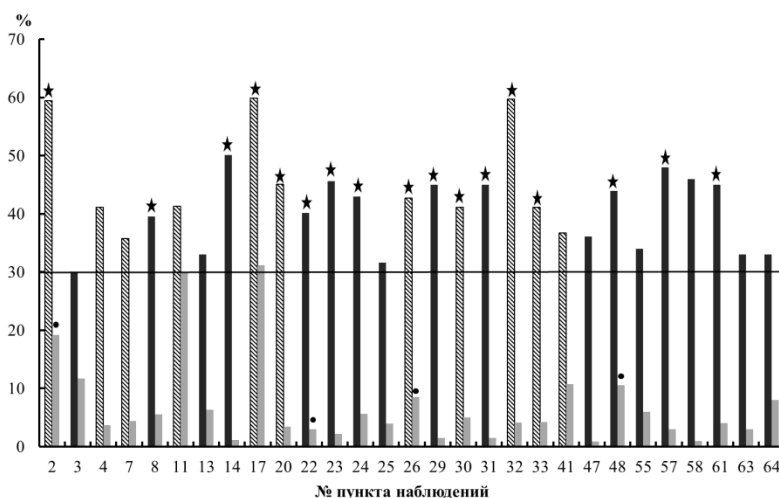


Рис. 2. Изменение средних значений (серый столбец) и дисперсий (черный) в рядах годового стока рек от одного интервала к другому (только пункты с изменениями дисперсий $\geq 30\%$). Линия – отметка порога в 30%, звездочка – дисперсии отличаются с вероятностью 95% (Фишер),

точки – средние отличаются с вероятностью 95% (Манн-Уитни), штриховка – нарушена нормальность распределения с вероятностью 95% (Шапиро-Уилк).

Следует отметить, что чаще наблюдается обратная ситуация, т.е. когда имеет место неоднородность по математическому ожиданию при равенстве дисперсий (по Манну-Уитни и Фишеру соответственно) (рис. 1).

Такое же поведение, неизменность среднего и существенное изменение дисперсии, выявлено и в рядах осадков, например, в пунктах Anchorage (США), Stornoway и Lerwick (Великобритания).

Таким образом, ряды стока и осадков могут оказываться однородными по отношению к средним (математическим ожиданиям), но неоднородными по отношению к дисперсии и коэффициенту автокорреляции. Чтобы подтвердить отмеченную изменчивость дисперсии стока и осадков, и неизменность средних значений, необходимо провести совместное исследование неоднородности этих процессов. Если дисперсия процесса будет меняться не только в рядах стока, но и в рядах осадков, тогда можно считать реальность изменения дисперсии стока достаточно обоснованной.

Такое исследование проведено для бассейна р. Северная Двина [9, 10]. Оно подтвердило, что в многолетних колебаниях, как стока, так и осадков есть два относительно длительных интервала времени (1891–1949 гг. и 1950–2008 гг.), характеризующиеся существенным различием по вторым моментам – дисперсии и автокорреляции – при неизменном математическом ожидании. Во всех исходных рядах (стока, осадков) статистически значимого различия между средними величинами и дисперсиями с вероятностью 95% (по критериям Манна-Уитни и Фишера соответственно) для обоих интервалов не выявлено. Критерий Манна-Кендалла, примененный к скользящим 50-летним средним осадков и стока, также не выявил трендов в средних, но показал возможность с вероятностью 90% наличие трендов в рядах соответствующих дисперсий. Применение динамико-стохастической модели многолетних колебаний стока [11, 12] для С. Двины показало соответствие изменений статистических характеристик стока и осадков. Изменение режима стока и осадков могло произойти из-за смещения центров действия атмосферы во времени и пространстве.

Таким образом, можно констатировать, что есть случаи, когда внутри стационарного процесса по первому моменту (неизменное среднее от одного периода к другому) может наблюдаться нестационарность по второму моменту – дисперсии, а в некоторых случаях и коэффициенту автокорреляции.

Изменения стока рек, атмосферных осадков, температуры воздуха, многими авторами также связываются с климатическими изменениями: перестройкой атмосферной циркуляции; с изменениями в основных океанских течениях, например, Эль-Ниньо (ENSO); общим количеством облачности (см., например, [5, 6, 8, 13, 14, 16] и др.). Эти глобальные климатические изменения в XX веке начали проявлять с конца 1960-х–начала 1970-х гг. В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [15] такие изменения отмечены даже раньше, с 1950-х годов. В наших исследованиях, в большинстве случаев, переломными между двумя интервалами как раз и оказывались 40-е–50-е годы.

Выводы.

В многолетних колебаниях стока рек Европы, России, Северной Америки и Австралии обнаружены относительно длительные интервалы времени (в основном 50 и более лет), характеризующиеся существенным различием дисперсий между ними. В некоторых случаях различается и автокорреляция. Таким образом, ряды наблюдений стока рек оказались неоднородными по вторым моментам. Особенностью выявленной неоднородности оказалось практическая неизменность средних величин стока для рассмотренных интервалов.

Такое же поведение, неизменность среднего и существенное изменение дисперсии, выявлено и в рядах осадков, например, в пунктах Anchorage (США), Stornoway и Lerwick (Великобритания).

Возможно, наблюдаемые тенденции связаны как с тенденциями в метеорологических переменных, так и с крупномасштабным океаническим и атмосферным процессом.

Для дальнейшего исследования, необходимо привлечь данные не только по стоку рек, но и по осадкам в бассейнах тех рек, где обнаружено отличие по вторым моментам. Если

подтвердится изменение характеристик и в рядах осадков, то можно с большей уверенностью говорить о влиянии климатического воздействия на сток рек и осадки в этих бассейнах. Подобное исследование, проведенное нами для бассейна реки Северная Двина, показало, что в многолетних колебаниях, как стока, так и осадков есть два относительно длительных интервала времени, характеризующиеся существенным различием по вторым моментам – дисперсии и автокорреляции при неизменном математическом ожидании.

Представляется, что выявление неоднородностей не только по первым, но и по вторым моментам, позволит получить более обоснованное представление о реакции многолетних колебаний речного стока на климатические изменения в речном бассейне.

Литература

1. Burn D.H., Elnur M.A.H. Detection of hydrologic trends and variability//Journ. ofHydrol. 2002. V.255.P.107-122.
2. Hannaford J., Buys G., Stahl K., Tallaksen L.M. The influence of decadal-scale variability on trends in long European streamflow records//Hydrol. Earth System Sci.2013.V.17.P.2717-2733.
3. Sayemuzzaman M., Manoj M.K. Seasonal and annual precipitation time series trend analysis in North Carolina, United States//Atmospheric Research. 2014.V.137. P.183-194.
4. Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». М.:ГЕОС, 2002. 231 с.
5. Голицын Г.С., Ефимова Л.К., Мохов И.И., Тихонов В.А., Хон В.Ч. Долгопериодные изменения режима температуры и осадков в Санкт – Петербурге по эмпирическим данным и модельные оценки региональных изменений в прошлом и будущем // Метеорология и гидрология. 2004. №8. С.5-17.
6. Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Анализ многолетних колебаний стока рек бассейна Северного ледовитого океана // Водные ресурсы.2005. Т.32, №6. С.645-652.
7. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Глава 2. Гидрологический режим и водные ресурсы. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012.С. 53-86.
8. Фролова Н.Л., Белякова П.А., Григорьев В.Ю., Сазонов А.А., Зотов Л.В. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги// Водные ресурсы. 2017. Т.44, №3. С.243-255.
9. Фролов А.В., Соломонова И.В. Климатическая неоднородность в многолетних колебаниях водного баланса водосбора р. Северной Двины // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. Сборник научных трудов: посвящается Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН. Институт водных проблем Российской академии наук, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр. Новочеркасск: Лик, 2017. С.275-281.
10. Соломонова И.В., Фролов А.В. Неоднородности в многолетних колебаниях речного стока и основных гидроклиматических процессов в бассейне Северной Двины в условиях изменения климата // Третьи Виноградовские Чтения. Грани гидрологии. Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова. Санкт-Петербург: Научное издание, 2018. С.646-650.[Электронный ресурс]
11. Фролов А.В. Дискретная динамико-стохастическая модель многолетних колебаний речного стока//Водные ресурсы. 2011. Т.38, №5. С.538-547.
12. Фролов А.В. Оценка статистических характеристик многолетних колебаний испарения с крупных речных водосборов//Доклады академии наук. 2014. Т.458, №3. С.345-348.
13. Burn D.H. Hydrologic effects of climatic change in west-central Canada//Journal of Hydrology. 1994. V.160. P.53-70.
14. Pekarova P., Miklanek P., PekarJa. Long-term trends and runoff fluctuations of European rivers. 2006. Climate Variability and Change–Hydrological Impacts (Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006), IAHS Publ. 308. P.520-525.
15. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов, Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария, 2014. 163 с.
16. Tian Q., Prange M., Merkel U. Precipitation and temperature changes in the major Chinese river basins during 1957–2013 and links to sea surface temperature// Journal of Hydrology. 2016. V.536. P.208-221.