

2. *Войтишек А.В., Михайлов Г.А.* Численное статистическое моделирование: Метод Монте-Карло. ИЦ Академия. 2006. С.368.
3. *Сванидзе Г.Г.* Основные расчеты регулирования речного стока методом Монте-Карло. Тбилиси. Мецинереба. 1964
4. *Соколовский Д.Л.* Речной сток. – Л.: Гидрометеониздат. 1968. С. 491.

ДОЛГОСРОЧНЫЙ АНСАМБЛЕВЫЙ ПРОГНОЗ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ И ЛЕТНЕЙ МЕЖЕНИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА⁹

Морейдо В.М.

Институт водных проблем РАН, г. Москва
moreido@mail.ru

Введение. Долгосрочное (квартальное, сезонное) прогнозирование притока воды к водохранилищам является важным фактором повышения эффективности управления водохозяйственными системами. При регулировании стока зачастую требуется решить сложную задачу сохранения бесперебойной выработки электроэнергии на ГЭС и водоснабжения потребителей, при условии сохранения режима экологического стока для обводнения поймы в весенний период и поддержания уровней воды в период навигации [1]. Все это делает задачу долгосрочного прогнозирования притока чрезвычайно актуальной.

В последнее время в мировой практике долгосрочного гидрологического прогнозирования происходит постепенный переход от традиционно применяемых детерминистических прогнозов речного стока с использованием эмпирических (регрессионных, физико-статистических) зависимостей между стоком и стокообразующими факторами [2; 3] к ансамблевым прогнозам с использованием моделей формирования речного стока [4–6]. При использовании последнего подхода в качестве начальных условий в модели задаются: измеренные или рассчитанные на дату выпуска прогноза данные о предшествующем состоянии водосбора (характеристики снежного

⁹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-05-00562).

покрова, влажности почвы, запасов воды в русловой сети и др.); а метеорологические воздействия на водосбор за период заблаговременности – в виде ансамбля возможных сценариев погоды, определяемых, как правило, по данным наблюдений за предшествующие годы. Такая методика позволяет на выходе модели получить ансамбль прогнозируемых гидрографов стока, что создает возможность выпуска прогноза в вероятностной форме – в виде распределений вероятности характеристик стока (объема стока, максимальных и минимальных расходов и др.). В качестве ансамблей входных метеорологических величин за период заблаговременности прогноза могут быть использованы не только данные наблюдений прошлых лет (ограниченные, как правило, несколькими десятками лет), но и искусственные последовательности указанных величин, рассчитанные с помощью стохастических моделей временных метеорологических рядов (т.н. «стохастического генератора погоды»). Впервые возможности долгосрочного прогноза весеннего половодья на основе динамико-стохастической модели – физико-математической модели формирования стока в сочетании со стохастическим генератором погоды – были показаны в работах Л.С. Кучмента и А.Н. Гельфана [5, 6].

В настоящей работе методика построения ансамблевых прогнозов на основе динамико-стохастической модели формирования стока применена для долгосрочного прогнозирования незарегулированного притока воды к Чебоксарскому водохранилищу в период половодья и летней межени. Проверка методики прогноза производилась по данным о незарегулированном притоке воды к водохранилищу за 29 лет с момента наполнения водохранилища в 1982 году по 2010 год.

Описание динамико-стохастической модели формирования бокового притока воды к Чебоксарскому водохранилищу. В основе структуры разработанной динамико-стохастической модели лежит физико-математическая модель формирования стока в речных бассейнах с распределенными параметрами ECOMAG (ECOLOGical Model for Applied Geophysics), созданная Ю.Г. Мотовиловым [7] на базе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов Института водных проблем РАН [8]. С 2002 года комплекс ECOMAG используется в системе Федерального агентства водных ресурсов для сценарных рас-

четов боковой приточности к водохранилищам Волжско-Камского каскада.

Калибровка и проверка модели ECOMAG производилась по данным о ежедневных расходах притока воды в Чебоксарское водохранилище за период с 01.01.1982 г. по 31.12.2010 г. Получено удовлетворительное соответствие между фактическими и рассчитанными гидрографами стока: критерий эффективности Нэша-Сатклиффа за 29-летний период получился равным 0.86.

На рис. 1 представлены графики связи фактических и рассчитанных объемов притока за весенний (март-май) и летний (июнь-август) сезоны: коэффициент линейной корреляции между рядами получился выше 0.8.

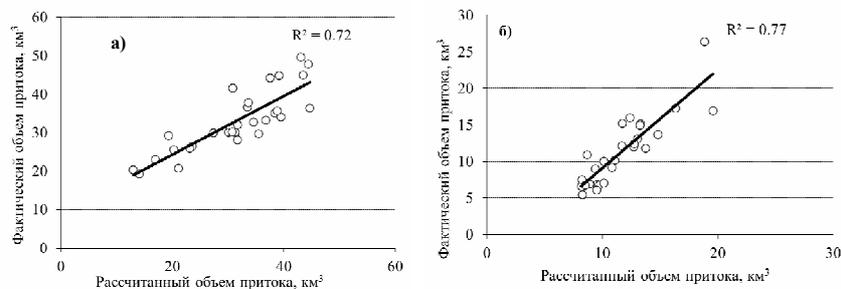


Рис. 1 – Связь рассчитанных и фактических объемов притока воды в Чебоксарское водохранилище за весенний (а) и летний (б) сезоны.

В качестве стохастического компонента динамико-стохастической модели был использован пространственно распределенный генератор погоды SFRWG, описанный в статье [9]. Оценка параметров пространственно распределенного генератора производилась на основе данных наблюдений на 15 метеорологических станций в бассейне и вокруг границ Чебоксарского водохранилища за период с 1966 по 2010 годы. На этой основе были рассчитаны 1000-летние ряды среднесуточной температуры воздуха, суточной суммы осадков и среднесуточного дефицита влажности воздуха. Адекватность моделирования проверялась путем сопоставления средних многолетних и сезонных величин, полученных по исходному и рассчитанному ряду, но не задававшихся в генератор в качестве параметров. Также была оценена адекватность воспроизведения пространственной структуры полей метеорологических величин путем сопоставления пространственных корреляционных функций фактических и рассчитанных характеристик (рис. 2).

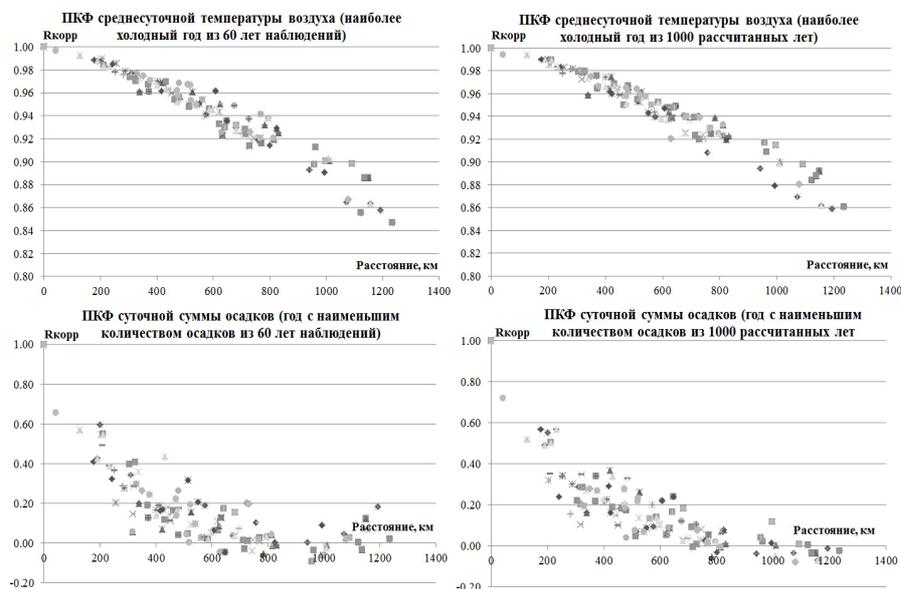


Рис. 2 – Сопоставление пространственных корреляционных функций (ПКФ) метеовеличин по данным наблюдений и рассчитанных по генератору SFRWG

Методика и результаты прогноза. Методика построения ансамблевого долгосрочного прогноза притока воды в Чебоксарское водохранилище с помощью описанной динамико-стохастической модели состоит в следующем. Вначале по модели ECOMAG рассчитывались показатели предшествующего состояния бассейна на дату составления прогноза (1 марта для половодья и 1 июня для межени) с использованием рядов фактически наблюдавшихся метеорологических величин за несколько месяцев до даты прогноза. Далее с помощью пространственно распределенного стохастического генератора погоды SFRWG рассчитывался ансамбль из 500 сценариев погоды за период заблаговременности прогноза (3 месяца). По этим сценариям с помощью модели ECOMAG рассчитывался ансамбль из 500 гидрографов ежедневного притока воды в Чебоксарское водохранилище в течение рассматриваемого сезона.

Проверка предлагаемой методики осуществлялась на основании проверочных прогнозов незарегулированного бокового притока воды в водохранилище за 29 лет – с 1982 года (год заполнения водохранилища) по 2010 год. На рис. 3 представлены графики связи фактических и спрогнозированных, осредненных по ансамблю из

500 членов, объемов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за весенний и летний периоды.

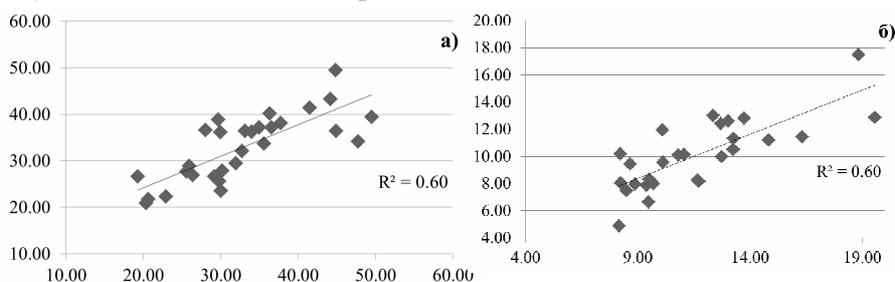


Рис. 3 – Связь фактических и спрогнозированных (средних по ансамблю гидрографов стока) объемов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за весенний (а) и летний (б) периоды, куб. км.

Отношения среднеквадратических погрешностей прогноза среднего объема к среднеквадратическим отклонениям соответствующих фактических величин получились равными 0.65 и 0.80 для весеннего и летнего сезонов соответственно.

Результаты ансамблевых прогнозов могут быть проиллюстрированы графиками функций распределения прогнозируемых характеристик (рис. 4). Ординаты интегрального распределения величины y_{np} для j -го половодья из проверочного ряда рассчитываются

как: $F_m(j) = \sum_{i=1}^m f_i(j)$, $m=1, \dots, M$; $j=1, \dots, N$ (M – число интервалов

вероятностей, на которое разбивается распределение; N – число проверочных прогнозов; f_i – вероятность попадания прогнозируемой величины в заданный интервал); ординаты распределения величины $y_{факт}$ для того же половодья, как: $O_m = \sum_{i=1}^m o_i$, где $o_i = 1$ для интервала с наблюдаемой величиной и $o_i = 0$ – для остальных.

Информативной характеристикой, которая может быть получена благодаря применению кривых распределения объемов притока воды к водохранилищу, является доверительный интервал прогноза. Так, например, для низкой межени 1992 года доверительный интервал составил 6,5 – 15,1 км³ при фактическом притоке 8,2 км³, а для экстремально высокого половодья 1986 года прогнозный интервал составил 35 – 54 км³ при фактически наблюдаемом притоке 44 км³.

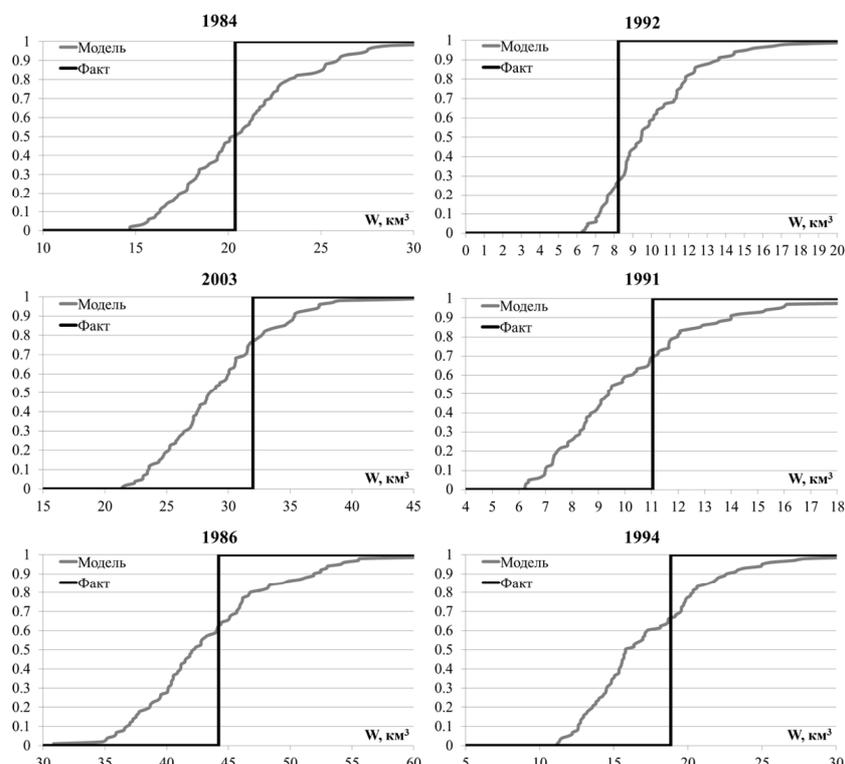


Рис. 4 – Функции распределения вероятности долгосрочных прогнозов (тонкие линии) объема притока воды к Чебоксарскому водохранилищу в сравнении с функциями распределения фактических характеристик стока (жирные линии) характерных половодий (левый столбец) и межени (правый)

Литература

1. *Арсеньев Г.С.* Основы управления водными ресурсами водохранилищ. СПб. Изд-во РГГМУ, 2003 г. - 78 с.
2. *Попов Е.Г.* (ред.) Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. Ленинград, Гидрометеиздат, 1989. - 359 с.
3. U.S. Army Corps of Engineers. *Runoff from Snowmelt.* – University Press of the Pacific: Honolulu, HI; F-14. – 1998. – 142 p.
4. *Franz J K Hartmann H C Sorooshian S and Bales R.* Verification of National Weather Service Ensemble Streamflow Predictions for water supply forecasting in the Colorado River Basin. – J. Hydrometeorology. – 2003. – V.4. – P. 1105–1118.

5. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока. Метеорология и гидрология, №2, 2007, С. 83–95.

6. Gelfan A.N., Motovilov Yu.G. Long-term hydrological forecasting in cold regions: retrospect, current status and prospect. Geograph Compass 3(5), 2009, Pp. 1841-1864.

7. Motovilov, Yu. G., Gottschalk, L., Engeland, K. and Belokurov, A.: ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series. no.105, 1999. 88 p.,

8. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. – М.: Наука, 1983. -230 с.

9. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования //Лед и Снег, 2015 (в печати).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОГО И ТЕПЛООВОГО РЕЖИМОВ КРУПНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО РЕГИОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СЪЕМКИ С МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ

Музылев Е.Л.¹, Старцева З.П.¹, Успенский А.Б.², Волкова Е.В.²

¹Институт водных проблем РАН, г. Москва

²Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии
“Планета” Росгидромета, г. Москва
muzylev@aqua.laser.ru

Перспективный путь получения корректных оценок компонент водного и теплового балансов значительных по размерам территорий заключается в настоящее время в создании физико-математических моделей вертикального влаго- и теплообмена подстилающей поверхности с атмосферой (LS-моделей, Land Surface Model) и разработке методов расчета этих компонент для указанных территорий с помощью таких моделей. Разработка версии LS-модели для теплого периода года, адаптированной к спутниковой информации о состоянии подстилающей поверхности (ПП) и метеоусловиях, и расчет с ее помощью компонент водного и теплового балансов территории регионального масштаба для сезона вегетации составляли