

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНСАМБЛЕВЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

© 2014 г. Л.С. Кучмент

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

Ключевые слова: гидрологические прогнозы, ансамблевые прогнозы, управление водными ресурсами, моделирование гидрологических процессов.



Л.С. Кучмент

Рассмотрены методические основы ансамблевых гидрологических прогнозов и возможности их использования для управления водными ресурсными системами. Описаны основные особенности структуры систем ансамблевого прогнозирования и методы получения и использования дополнительной информации. Изложены методы оценки качества и учета неопределенности ансамблевых гидрологических прогнозов. Представлен международный опыт практического применения методов ансамблевого прогнозирования для краткосрочных гидрологических прогнозов. Описаны подходы и результаты использования идей ансамблевого прогнозирования для долгосрочных прогнозов весеннего половодья в России.

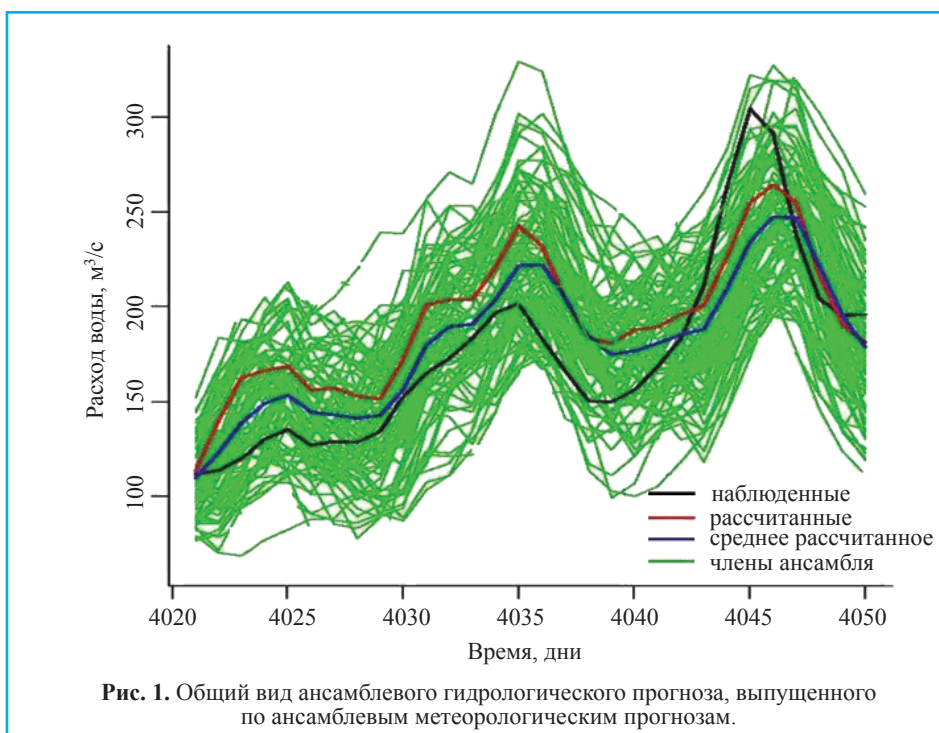
Введение

В последние 10–15 лет достигнуты значительные успехи в разработке методов гидрологических прогнозов и их практическом применении. Создание моделей формирования стока и систем, обеспечивающих эти модели текущей гидрометеорологической информацией и метеорологическими прогнозами в автоматическом режиме, способствовали внедрению в оперативную практику систем гидрологического прогнозирования, с помощью которых можно выпускать непрерывные прогнозы стока различной заблаговременности по всем основным створам информационной сети речных систем. Так, например, в США непрерывные ежедневные прогнозы речного стока выпускаются по данным гидрометеорологических наблюдений и метеорологических прогнозов по более 6000 створам. Плотная информационная сеть пунктов, для которых выпускаются ежедневные гидрологические прогнозы, охватывает и территорию Европейского Союза. Постоянно ведутся работы по повышению точности и надежности гидрологического

прогнозирования путем улучшения качества используемых моделей формирования стока и привлечения дополнительной исходной информации. Вместе с тем все более актуальной становится проблема обеспечения как можно более полного и в то же время осторожного использования прогностической информации потребителем с учетом возможных ошибок прогнозов и имеющихся в прогнозах неопределенностей.

В связи с этим в последние 5–7 лет заметно активизировались исследования по качественному изменению парадигмы гидрологического прогнозирования: детерминистические (однозначные) прогнозы заменяются на интервале прогнозирования ансамблями прогнозируемой величины или соответствующими им вероятностными распределениями. Ансамбли прогнозов могут быть получены с помощью разных методик по одним и тем же исходным данным или с помощью одной и той же методики, но при отличающихся входных данных, что дает возможность в той или иной мере оценить неопределенность прогнозов, обусловленную возможными ошибками в этих данных и в самих методиках прогнозов. Если считать все члены прогностических ансамблей равновероятными, то от ансамблевого представления легко перейти к вероятностному и таким можно рассматривать ансамблевые прогнозы как частный случай вероятностных.

Развитие методов ансамблевого прогнозирования связано с совершенствованием численных методов прогнозирования погоды. Численные решения гидродинамических уравнений погоды являются неустойчивыми и весьма чувствительными к изменениям начальных условий, методам описания подсеточных процессов, выбору численных схем и пространственно-временных шагов. Мелкомасштабные ошибки в задании исходных полей элементов погоды могут неограниченно возрастать во времени, искажая предвычисляемую динамику крупномасштабных метеорологических процессов. Это приводит к тому, что прогнозы погоды заблаговременностью более двух суток в зависимости от способов задания начальных условий, используемой модели погоды или способов решения гидродинамических уравнений могут существенно отличаться. Развитие вычислительной техники и появление суперкомпьютеров создало возможности для многократного выпуска прогнозов погоды по одной исходной информации, но при разных способах ассимиляции и интерполяции начальных условий или с помощью различных прогностических схем. В результате прогноз погоды представляется на интервале прогнозирования в виде ансамбля («спагетти») 20–50 численных решений уравнений погоды, что дает возможность определить возможный разброс прогнозируемых величин. Разработка методов ансамблевых гидрологических прогнозов началась с исследования возможностей использования ансамблевых прогнозов погоды для гидрологического прогнозирования (общий вид таких прогнозов представлен на рис. 1).



В то же время подходы, используемые для повышения качества гидрологических прогнозов и учета неопределенности, заключенные в ансамблевом прогнозировании, позволяют использовать имеющийся опыт вероятностных гидрологических прогнозов и могут быть весьма продуктивными и для случаев, где ансамблевые прогнозы погоды не используются.

Привычные для современного пользователя детерминистические (однозначные) гидрологические прогнозы позволяют определять лишь математическое ожидание прогнозируемой величины, игнорируя информацию об ее менее вероятных значениях. Однако для выбора оптимальных решений при управлении водными ресурсами важна также информация о различных квантилях прогнозируемых величин и оценка вероятности редких катастрофических явлений. Поэтому при разработке методов гидрологических прогнозов желательно обеспечить успешность прогнозирования не только математического ожидания, но и различных квантилей прогнозируемых величин. Представление гидрологических прогнозов в виде ансамблей прогнозируемых величин или их вероятностных распределений при соответствующем выборе критериев качества прогнозов позволяет решать эту задачу путем привлечения дополнительной информации об источниках неопределенности и выбора оптимального интервала прогнозирования.

На примере конкретных водно-ресурсных систем показано, что использование ансамблевых прогнозов стока обеспечивает большую экономическую эффективность, чем детерминистические прогнозы [1]. В то же время практическое использование ансамблевых прогнозов требует определенной подготовки. Лица, принимающие решение на их основе, должны иметь достаточное представление об исходной информации, используемой модели и методах оценки неопределенности. Важным является и учет особенностей задачи, для решения которой принимаются те или иные решения.

Оценка неопределенности и эффективности прогнозов

Основными источниками неопределенности в гидрологическом прогнозировании являются ошибки в метеорологических прогнозах и измерениях, используемых в качестве входной информации, и неопределенность, связанная с гидрологическими расчетами (пространственно-временные ошибки в задании начальных условий, неопределенность в выборе структуры моделей и калибровке их параметров, ошибки измерений на выходе гидрологической системы). Возможности общей оценки неопределенности прогноза зависят от сложности используемой гидрологической модели и исходной информации. Если считать гидрологическую модель адекватной описываемым гидрологическим процессам, решение этой задачи может быть получено аналитическими методами или методом Монте-Карло путем замены динамической модели динамико-стохастической с использованием вероятностных распределений параметров и входных данных. В [2, 3] предложен общий формальный байесовский подход к анализу неопределенностей, который позволяет отдельно учесть неопределенность, обусловленную входными данными и ошибками модели. С помощью этого подхода в [4] удалось для простой линейной модели движения воды в реке представить вероятностный прогноз водного режима в виде аналитической зависимости от вероятностного распределения поступления воды в речное русло.

Однако возможности аналитических методов весьма ограничены, а использование метода Монте-Карло для учета нескольких источников неопределенности из-за «проклятия размерности» может приводить к огромным, а иногда и нереальным затратам машинного времени. В связи с этим во многих работах предпринимаются попытки объединить источники неопределенности разного происхождения эмпирическим путем, используя имеющиеся измерения метеорологических и гидрологических величин. Например, в [5] сделана попытка учесть три источника неопределенности: 1) ансамблевые прогнозы системы COSMO-LEPS (16 членов ансамбля); 2) ансамблевое задание начальных условий путем ассимиляции данных измерений осадков с учетом возможных ошибок радара (25 членов);

3) возможные ошибки в параметрах гидрологической модели, которые давались методом Монте-Карло. В итоге неопределенность оценивали по гидрологическому ансамблю в 10 400 членов.

Процесс ансамблевого прогнозирования обычно разделяют на три части [16]: ансамблевый предпроцессор, где проводится ассимиляция, корректировка и ансамблевое или вероятностное задание входной метеорологической информации, процессор (сама гидрологическая модель, с помощью которой проводится выпуск прогнозов, и различные способы задания ее параметров) и постпроцессор, где вероятностные гидрологические прогнозы корректируются с учетом имеющихся измерений прогнозируемых величин и требований к качеству прогнозов (рис. 2).

В предпроцессоре ансамблевых прогнозов обычно вводятся поправки в метеорологические прогнозы на основе сравнения этих прогнозов с измеренными величинами, используемыми в качестве входной информации. Такие поправки позволяют устранить систематические ошибки метеорологических прогнозов и пространственно-временные различия между информацией, содержащейся в метеорологических прогнозах и входной метеорологической информацией, необходимой для гидрологических прогнозов. Эти поправки могут представлять собой постоянные коэффициенты, однако чаще всего они меняются в зависимости от метеорологических условий. В [6] предложено использовать для введения таких поправок совместные двумерные статистические распределения прогнозируемых осадков или температур и соответствующих им измеренных величин. В [7] вначале для каждого члена ансамблевого прогноза по данным многолетних наблюдений находят аналог синоптической ситуации и в ансамблевые прогнозы осадков и температуры воздуха вводят поправки, представляющие отношение прогнозируемой величины, наблюдавшейся в аналоге, к ее средней величине, определенной по всему прогностическому ансамблю. В предпроцессор может быть включен также блок подготовки начальных условий для гидрологической модели, в особенности если это сложная модель с несколькими входами.

При построении постпроцессора прежде всего делается попытка устранить систематическое смещение статистических оценок, полученных с помощью ретроспективных гидрологических ансамблевых прогнозов и по данным гидрологических наблюдений. В [7] проведено сравнение трех способов устранения такого смещения: 1) вводятся поправки в каждый член ансамбля на основании ранее эмпирически определенных отношений наблюдаемого значения прогнозируемой величины к среднему по ансамблю прогнозу за период заблаговременности прогноза; поправки имеют сезонный ход; 2) смещение устраняется путем использования регрессионной связи между прогнозируемыми и наблюдаемыми объемами; 3) для устранения смещения используются интегральные вероятностные распределе-

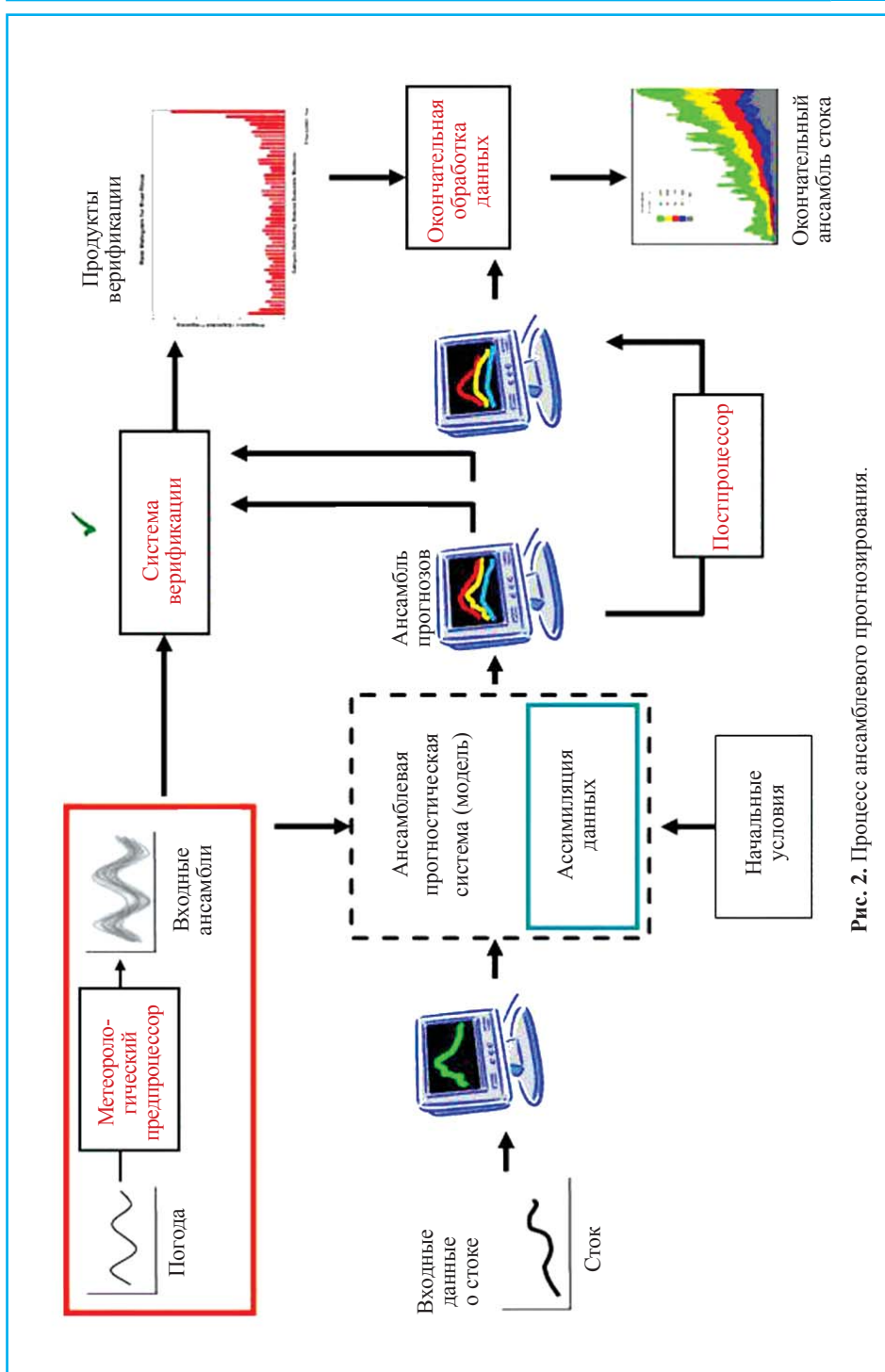


Рис. 2. Процесс ансамблевого прогнозирования.

ния прогнозируемых и наблюдаемых объемов и для заданных вероятностей превышения прогнозируемые величины заменяются равнообеспеченными наблюдаемыми. Все три способа дали близкие результаты и значительное улучшение качества прогноза.

В [8] предполагается, что неопределенность прогноза определяется только ошибками гидрологической модели и для ее учета используют логарифмы отношений наблюдаемых и спрогнозированных по гидрологической модели расходов. Эти отношения были разделены для каждой заблаговременности прогноза на 20 классов путем разбиения распределения интегральной вероятности и получены соответствующие переходные коэффициенты. В некоторых работах для оценки общей неопределенности прогноза предложено использовать регрессионные связи различных квантилей распределений ошибок прогноза, определенных путем реконструкции прогнозов по данным наблюдений, со значениями прогнозируемой величины. Перед построением уравнений регрессии проводят трансформацию исходных рядов для приведения их к распределению Гаусса. Так, в [9] предложено использовать для оценки неопределенности прогноза уравнение регрессии

$$Z_{k+1}^0 = (1 - b)Z_k^0 + bZ_{k+1}^S + E_{k+1}, \quad (1)$$

где Z_k^0 и Z_{k+1}^0 – нормализованные наблюдаемые расходы в моменты k и $k+1$;

Z_{k+1}^S – нормализованные прогнозные расходы в момент $k+1$;

E_{k+1} – случайная ошибка в момент $k+1$;

b – коэффициент, отражающий вес прогнозируемой величины.

Уравнения строят для каждой заблаговременности прогноза. Применение такой процедуры для нескольких водосборов Англии и Уэльса указывает на ее робастность и эффективность [10].

При определении возможной заблаговременности прогноза и оценки риска его использования важно выбрать соответствующие показатели качества прогнозов. В отличие от обычно принятых оценок детерминистических прогнозов, где основным критерием эффективности прогнозов является отклонение прогнозируемых величин от априори задаваемых (например, климатической нормой или инерционно задаваемых величин), качество вероятностных прогнозов оценивают по нескольким показателям с учетом требований потребителя прогнозов. При выборе этих показателей, которые могут использоваться в виде численных критериев, диаграмм или гистограмм, стремятся обеспечить надежность прогнозов (близость вероятностного прогноза к средней частоте прогнозируемого события, определенной по данным наблюдений за период верификации прогнозов), отчетливость (возможность оценивать вероятность событий, близкую

к 0 или 1) и, наконец, разрешительную способность (способность отличить относительную частоту появления прогнозируемого события при прогнозах от относительной частоты его появления по данным наблюдений за период верификации) [11]. Учитывая сложность пространственной картины развития гидрологических процессов в речной системе и недостаточную точность метеорологических прогнозов, вместо прогнозирования расходов воды как непрерывных величин часто ограничиваются прогнозированием бинарного события: превысит или не превысит расход воды заданную критическую величину (заданный порог). Вероятностный прогноз f_j определяется как относительная частота членов ансамбля, превышающих заданный i -й порог. Подобным образом определяется и вероятность соответствующей наблюдавшей величины O_i : она равна 0, если наблюдаемая величина меньше заданного порога, или равна 1, если наблюдаемая величина превышает заданный порог. Интегральное распределение прогнозируемой величины можно рассчитать как

$$F_m = \sum_{j=1}^m f_j, \quad m = 1, \dots, J, \quad (2)$$

где J – число пороговых значений. Интегральное распределение наблюдаемой величины имеет вид

$$Q_m = \sum_{j=1}^m Q_j, \quad m = 1, \dots, J. \quad (3)$$

Если наблюдаемая величина O_i находится между двумя порогами, то между ними O_i считается равным 1, а между остальными порогами равной 0.

Наиболее часто для оценки качества вероятностных прогнозов применяется критерий Брайера, который для одного прогноза вычисляется как

$$\overline{RPS} = \sum_{m=1}^j (F_m - O_m)^2, \quad (4)$$

а для n прогнозов находится как

$$\overline{RPS} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RPS_k. \quad (5)$$

Относительное качество вероятностных прогнозов оценивается путем сравнения с климатическими прогнозами с помощью ранжированного вероятного показателя качества прогнозов $RPSS$

$$RPSS = \frac{\overline{RPS} - \overline{RPS}_{cl}}{0 - \overline{RPS}_{cl}}, \quad (6)$$

где \overline{RPS} – среднее значение RPS за отдельный прогностический интервал;
 \overline{RPS}_{cl} – среднее значение RPS при использовании климатических наблюдений за этот же интервал.

Краткосрочные ансамблевые гидрологические прогнозы

Численные прогнозы погоды на сроки меньше 2 суток обычно выпускаются в детерминистической форме, однако их точность значительно зависит от физико-географических особенностей рассматриваемого района, что делает предпочтительным использование ансамблевых гидрологических прогнозов и на эти сроки. Исследования по разработке методов краткосрочных ансамблевых гидрологических прогнозов и определении их возможной заблаговременности проводили в многочисленных гидрологических прогностических центрах [12], представлены результаты 38 таких исследований. Преимущества и ограничения различных методов учета и уменьшения неопределенности краткосрочных гидрологических прогнозов, обусловленных недостаточной точностью входной информации, а также неадекватностью структуры гидрологических моделей и ошибками в их параметрах, сопоставлялись в рамках инициированного ВМО международного проекта HEPEx (Hydrological Ensemble Prediction Experiment) [13].

В ряде работ показано, что ансамблевые гидрологические прогнозы вместе с увеличением выпускаемой информации о развитии гидрологических явлений обеспечивают и более высокую заблаговременность прогнозов. В [14] приведены результаты исследования возможностей ансамблевых прогнозов для 7 створов бассейна р. Рейн. Использовали две системы метеорологических прогнозов: глобальные прогнозы Европейского центра для прогнозов на средние сроки (прогнозы каждые 12 часов до 10 суток, размер сетки 80 км, число ансамблей – 51) и региональные прогнозы системы COSMO-LEPS (прогнозы каждые 3 часа до 135 часов, размер сетки 10 км, число ансамблей – 16). По времени добегания заблаговременность гидрологических прогнозов для рассматриваемых створов доходит до 4 дней. Прогнозы Европейского центра дали возможность получить эффективные гидрологические прогнозы с заблаговременностью до 9 дней. Для заблаговременности до 135 часов заметно лучшая эффективность гидрологических прогнозов была получена при использовании COSMO-LEPS. В [15] исследованы возможности увеличения заблаговременности прогнозов стока на основе ансамблевых прогнозов осадков Европейского центра прогнозов на средние сроки на примере двух бельгийских речных

бассейнов с водосборной площадью 1775 и 1616 км². Оказалось возможным увеличить прогноз до 9 дней. В [7] исследования вели по данным наблюдений на 11 французских водосборах площадью от 220 до 3600 км². Верификацию прогнозов проводили за 48-месячный период. Показана возможность суточных прогнозов по 50 членам метеорологических ансамблей с заблаговременностью до 7 дней.

В настоящее время во многих зарубежных прогностических центрах созданы или создаются системы для выпуска краткосрочных ансамблевых гидрологических прогнозов, которые объединены с системами выпуска ансамблевых метеорологических прогнозов, что облегчает проведение ретроспективных прогнозов, связанных с выбором оптимальной заблаговременности прогноза и их верификацией.

В Национальной Службе Погоды (НСП) США проведена большая работа по подготовке методических указаний по разработке и верификации методов ансамблевых гидрологических прогнозов с использованием выпускаемых НСП ансамблевых прогнозов температуры и осадков [6, 9, 17], а с 2011 г. начались работы по организации службы ансамблевых гидрологических прогнозов во всех речных прогностических центрах США. Одной из первоочередных работ при создании этой службы является разработка ансамблевых гидрологических прогнозов для управления водобеспечением г. Нью-Йорка.

Многочисленные исследования по разработке методов краткосрочных ансамблевых гидрологических прогнозов и оценке их возможной заблаговременности проводили и для европейских рек. С 2003 г. под эгидой Европейской Комиссии ЕС разрабатывается система оповещения о наводнениях для всей Европы с использованием ансамблевых прогнозов погоды Европейского центра прогнозов на средние сроки.

В России разработки краткосрочных ансамблевых гидрологических прогнозов до настоящего времени не проводили. Основной причиной этого можно считать отсутствие необходимых рядов ансамблевых прогнозов погоды. Представляется, что использование таких рядов может существенно улучшить качество и заблаговременность краткосрочных прогнозов талого стока и возможно дождевых паводков.

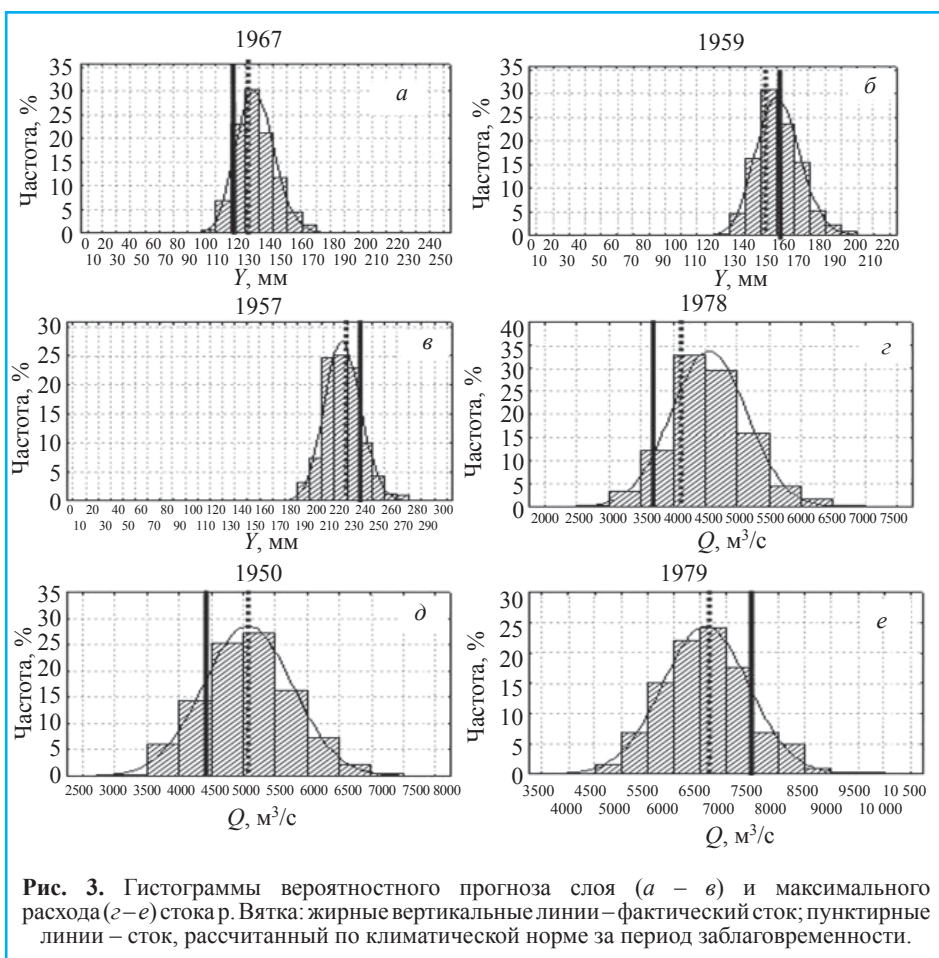
Долгосрочные гидрологические прогнозы

Технология ансамблевого прогнозирования оказалась эффективной и для долгосрочных прогнозов речного стока (заблаговременностью от нескольких недель до нескольких месяцев). Первые работы в этой области были выполнены на примере двух горных речных бассейнов США [18, 19]. С помощью концептуальных моделей формирования стока с сосредоточен-

ными параметрами по имеющимся метеорологическим наблюдениям рассчитывали показатели состояния водосбора к моменту выпуска прогноза, и затем по ансамблям погод за период заблаговременности прогноза, наблюдавшихся в предыдущие годы, рассчитывали возможные ансамбли гидрографов стока и вероятностные распределения прогнозируемого объема стока. Такой подход обеспечил эффективный вероятностный прогноз объема стока с заблаговременностью до месяца.

Для физико-географических условий России наибольшее значение имеют долгосрочные гидрологические прогнозы весеннего стока крупных равнинных рек, где заблаговременность прогноза может достигать 2–3 месяцев. В настоящее время такие прогнозы выпускаются в детерминистической форме на основе регрессионных связей объема стока с запасами воды в снеге и индикаторами состояния почвогрунтов перед снеготаянием при предположении, что метеорологические условия за период заблаговременности прогноза близки к климатической норме. Использование этих прогнозов для пропуска весеннего половодья нередко приводит к значительным экономическим и экологическим ущербам, т. к. точность регрессионных связей в отдельные годы оказывается очень низкой.

В Институте водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН) проведены исследования возможностей повышения качества долгосрочных прогнозов весеннего стока с помощью физико-математических моделей формирования стока с распределенными параметрами, включающих описание динамики переноса тепла и влаги в зимний и осенний период. Эти исследования показали, что использования таких моделей позволяет существенно улучшить точность и надежность детерминистических расчетов весеннего стока по сравнению с расчетами на основе регрессионных связей [20, 21]. Долгосрочные метеорологические прогнозы с заблаговременностью 2–3 месяца не выпускаются, однако в большинстве случаев объем весеннего стока определяется начальными условиями перед снеготаянием. Неопределенность, которую вносит отсутствие метеорологических данных за период заблаговременности прогноза, может быть оценена путем использования ансамблей погод, наблюдавшихся в предшествующие годы за период заблаговременности прогноза или случайных ансамблей погод, построенным с помощью генераторов погоды по этим наблюдениям. По ансамблям возможных погод с помощью моделей формирования стока можно получить ансамбли прогнозируемых гидрографов стока и по ним находить не только наиболее вероятные прогнозируемые характеристики стока, которые определяются при детерминистическом прогнозе, но и строить вероятностные распределения прогнозируемых объемов талого стока и максимальных расходов для оценки неопределенности прогноза. Общий вид вероятностного прогноза объема стока весеннего половодья представлен на рис. 3.



Применение физико-математических моделей формирования стока с распределенными параметрами дает возможность помимо учета неопределенности в задании метеорологических условий за период заблаговременности прогноза также оценивать неопределенность прогнозов, обусловленную различным пространственным распределением метеорологических величин и использованием разных предикторов и начальных условий. Преимущества применения физико-математических моделей формирования стока с распределенными параметрами для долгосрочных прогнозов объема и максимального расхода весеннего половодья, а также использования идей ансамблевого прогнозирования для повышения эффективности этих прогнозов на примере рек Вятка, Сосна и Сейм показаны в [20, 21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Boucher M.A., Ancill F., Perreault L., Tremblay D.* A comparison between ensemble and deterministic hydrological forecasts in an operational context // *Adv. in Geosci.* 2011. Vol. 29. P. 85–94.
2. *Krzysztofowicz R.* Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model // *Water Resources Res.* 1999. 35 (9). P. 2739–2750.
3. *Krzysztofowicz R.* Integrator of uncertainties for probabilistic river stage forecasting: precipitation-dependent model // *J. of Hydrol.* 2001. 249 (1–4). P. 69–85.
4. *Krzysztofowicz R.* Bayesian system for probabilistic river stage forecasting // *J. of Hydrol.* 2002. 268 (1–4). P. 16–40.
5. *Zappa M., Jaun S., Urs G., Walser A., Fundel F.* Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains // *Atmospheric Res.* 2011. Vol. 100 (2–3). P. 246–262.
6. *Schaake J., Demargne J., Hartman R., Mullusky M., Welles E., Wu L., Herr H., Fan X., Seo D.-J.* Precipitation and temperature ensemble forecasts from single-value forecasts // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2007. 4. P. 655–717.
7. *Hashino T., Bradley A. A. & Schwartz S. S.* Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2006. 3. P. 561–594.
8. *Zalachori, Ramos M.-H., Garc R., Mathevet T. & Gailhard J.* Statistical processing of forecasts for hydrological ensemble prediction: a comparative study of different bias correction strategies // *Adv. Sci. Res.* 2012. 8. P. 135–141.
9. *Seo D.J., Herr H.D., Schaake J.C.* A statistical post-processor for accounting of hydrologic uncertainty in short-range ensemble streamflow prediction // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2006. 3. P. 1987–2035.
10. *Weerts A.H., Winsemius H.C., Verkade J.S.* Estimation of predictive hydrological uncertainty using quantile regression: examples from the National Flood Forecasting System (England and Wales) // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. 15 (1). P. 255–265.
11. *Bartholmes J. C., Thielen J., Ramos M. H & Gentilini S.* The european flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2009. 13. P. 141–153.
12. *Cloke H.L., Pappenberger F.* Ensemble flood forecasting: A review // *J. of Hydrol.* 2009. 375 (1–4). P. 613–626.
13. *Schaake J.C., Hamill T.M., Buizza R., Clark M.* HEPEX: the Hydrological Ensemble Prediction Experiment // *Bull. of the Amer. Meteorol. Soc.* 2008. 88 (10). P. 1541–1547.
14. *Renner M., Werner M.G.F., Rademacher S., Sprokkereef E.* Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine // *J. of Hydrol.* 2009. 376. P. 463–475.
15. *Roulin E., Vannitsem S.* Skill of medium-range hydrological ensemble predictions // *J. of Hydrometeorol.* 2005. Vol. 6 (5). P. 729–744.
16. *Brown J.D., Demargne J., Seo D.J., Liu Y.* The Ensemble Verification System (EVS): a software tool for verifying ensemble forecasts of hydrometeorological and hydrologic variables at discrete locations // *Environmental Modelling and Software.* 2010. 25 (7). P. 854–872.
17. *Zhao L., Duan Q., Schaake J., Ye A., Xia J.* A hydrologic post-processor for ensemble streamflow predictions // *Adv. in Geosci.* 2011. 29. P. 51–59.
18. *Hashino T., Bradley A.A., Schwartz S.S.* Verification of probabilistic streamflow forecasts. IHR-Hydroscience & Engineering and Dep. Civil and Env. Eng., The University of Iowa, IHR Report No. 427. 2002.
19. *Franz J.K., Hartmann H.C., Sorooshian S., Bales R.* Verification of National Weather Service Ensemble Streamflow Predictions for water supply forecasting in the Colorado River Basin // *J. of Hydrometeorol.* 2003. 4. P. 1105–1118.

20. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Ансамблевые долгосрочные прогнозы весеннего половодья с помощью физико-математических моделей формирования стока // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 83–95.
21. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Исследование эффективности ансамблевых долгосрочных прогнозов весеннего половодья, основанных на физико-математических моделях формирования речного стока // Метеорология и гидрология. 2008. № 12. С. 81–94.

Сведения об авторе:

Кучмент Лев Самуилович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией гидрологического цикла, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: kuchment@mail.ru