

*В.А. Кузьмин, У. Е. Коротыгина, И.С. Макин, С.Ю. Сергеенко, Д.Ю. Румянцев*

## **ФОНОВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА В РЕЖИМЕ, БЛИЗКОМ К РЕАЛЬНОМУ ВРЕМЕНИ**

*V.A. Kuzmin, U.E. Korotygina, I.S. Makin, S.Yu. Sergeenko, D.Yu. Rummyantsev*

## **THE BACKGROUND NRT STREAMFLOW FORECASTING**

*В статье рассмотрены основные проблемы фонового прогнозирования стока в режиме, близком к реальному времени, а также пути их решения. Основное внимание уделено вопросам получения данных в режиме реального времени, их обработки и архивирования, процедурам оперативной рекалибровки гидрологических моделей и пост-обработке выпускаемых прогнозов.*

*Ключевые слова: база данных, обработка данных, моделирование, прогнозирование, калибровка модели, постобработка прогнозов.*

*In this paper, main issues of the background NRT streamflow forecasting and ways of their handling are considered. The main attention is paid to real-time data acquisition, processing and archiving, instant recalibration of hydrological models, and forecast post-processing.*

*Key words: data base, data processing, modelling, forecasting, model calibration, forecast post-processing.*

Фоновое моделирование стока в режиме, близком к реальному времени, — это полностью автоматизированная процедура, позволяющая рассчитать и отобразить общее состояние водотоков на сравнительно больших территориях, исключительно удобная и эффективная для, например, мониторинга опасных гидрологических явлений (ОГЯ) и снижения риска катастрофических наводнений [1]. Качественные фоновые прогнозы можно использовать в качестве сигнала для применения более точных, сложных и дорогостоящих (с точки зрения трудозатрат, затрат ресурсов процессора и необходимых данных) прогностических процедур, ориентированных на, например, определенный населенный пункт, опасность затопления которого выявлена при фоновом прогнозировании [2].

На многих водотоках фоновое прогнозирование — это единственный способ получить (пусть даже лишь в первом приближении) сколько-нибудь адекватную картину происходящего, например, формирующихся паводков и половодий, на основании которой принимаются те или иные управленческие решения. Поэтому фоновое прогнозирование не ограничивается только качественным описанием гидрологической обстановки на водотоках рассматриваемого региона; подобно «обычным» прогнозам, фоновые прогнозы должны и иметь точность и заблаговременность, достаточные для решения целого ряда прикладных задач. Эти задачи могут предъявлять различные требования к прогностическим данным, однако из практического опыта известно, что наибольший интерес представляют следующие виды фоновых прогнозов:

- Фоновые прогнозы фактической ситуации в удаленных точках или в пунктах наблюдений, данные с которых пока не поступили, в режиме реального времени (необходимые, например, для выявления зон повышенной опасности наводнения) [3];
- Фоновые прогнозы развития того или иного гидрологического процесса и явления в удаленных точках в недалеком прошлом (необходимые, например, для получения предварительных оценок ущерба, нанесенного наводнением) [3];
- Краткосрочные фоновые прогнозы, позволяющие оптимизировать действия по снижению ущерба от наводнения;
- Фоновые прогнозы повышенной заблаговременности. В различных странах мира прогнозы классифицируются по различным критериям; в данном случае имеется в виду, например, увеличение заблаговременности обычных краткосрочных прогнозов, обусловленной временем формирования стока на данном водосборе, за счет привлечения дополнительной информации, например, метеорологических прогнозов. Для небольшого водотока, на котором паводок формируется в течение нескольких часов, повышенная заблаговременность может быть равна 1-2 суткам. Для более крупных водотоков «обычная» заблаговременность может быть равна 4-5 суткам, а повышенная – 6-7 суткам и т.д. Важно подчеркнуть, что при этом категория прогноза с точки зрения заблаговременности не меняется. Например, краткосрочные прогнозы не становятся средне- или долгосрочными (в зависимости от классификации прогнозов, принятых в данной стране) [1, 2].

В данной работе будет рассмотрен лишь один вид прогнозов – это фоновые прогнозы стока в режиме, близком к реальному времени; в англоязычной литературе такие прогнозы обычно называются «**Near-Real-Time (NRT) forecasts**» [1, 3]. Невозможность прогнозирования стока в реальном времени обусловлена несколькими причинами:

- Время интегрирования измерений в зависимости от их дискретности (например, 1-часовой уровень воды – это средний уровень воды за 1 час, который может существенно отличаться от текущего уровня) не равно нулю;
- Время первичной (автоматической или, тем более, ручной) обработки данных наблюдателем не равно нулю;
- Дискретность данных, предоставляемых наблюдательной сетью потребителю, может быть даже больше времени интегрирования и дискретности наблюдений;
- Вторичная обработка данных потребителем (например, анализ и контроль качества) требует некоторого времени;
- Прогностическая процедура и постобработка прогнозов тоже занимает некоторое время.

Таким образом, даже в том случае, если ни на одном из этапов получения и обработки данных или выпуска прогноза не было никаких технических сбоев, имеет место задержка по отношению к реальному времени. На практике это означает, что, например, при наличии фактических данных об осадках и стоке на 9:00 местного времени, гидрограф, отражающий состояние водотока между гидрометрическими постами в 10:00, может быть смоделирован приблизительно в 11:00-12:00. Такая сравнительно небольшая задержка характерна только для развитых в гидрометеорологическом отношении стран – например, Великобритании [4], США [5, 6], Австралии

[7], Финляндии [8] и Японии [9]. В странах же с низкой пространственно временной дискретностью гидрометеорологических наблюдений такие прогнозы технически не возможны. Тем не менее, даже в таких странах (в частности, в Российской Федерации) существуют регионы, в которых очевидна потребность в точных фоновых прогнозах в режиме, близком к реальному времени. Поэтому автоматизированная система фонового прогнозирования (с различной заблаговременностью) может быть организована на локальном уровне, например, в зоне строительства объектов Олимпиады-2014 в Сочи.

При организации этой системы можно частично воспользоваться зарубежным опытом (например, опытом Метеобюро Правительства Австралии, которое организовало подобную систему в Китае в рамках гидрометеорологического обеспечения Олимпиады-2008 в Пекине), в основном, путем учета ряда недоработок и анализа способов повышения ее эффективности. Однако специфика организации Гидрометслужбы РФ не позволяет заимствовать зарубежные системы фонового прогнозирования целиком, без эффективной адаптации к условиям нашей страны [1, 2]. Для решения описанной проблемы на кафедре гидрологии суши Российского государственного гидрометеорологического университета была разработана пилотная версия системы фонового прогнозирования стока, при разработке которой были учтены и передовой зарубежный опыт, и особенности гидрометеорологического обеспечения Российской Федерации. Принципиальная схема этой системы показана на рис. 1. Рассмотрим ее более подробно.



Рис. 1 – Принципиальная схема системы фонового прогнозирования стока

Мероприятия в рамках этапов 1 и 2 выполняются либо силами локальных подразделений, обеспечивающих работу системы автоматизированных наблюдений,

либо национальными гидрометеорологическими службами или агентствами [1]. В наших экспериментах были использованы данные национальных гидрометслужб Австралии [7], США [5, 6], Финляндии [8] и Японии [9], однако организация подобных наблюдений в районе, например, олимпийских или других важных объектов не представляет особой сложности.

На третьем этапе данные, прошедшие первичную обработку поступают через сеть Интернет в динамическую базу данных аппаратно-программного комплекса «INWADA» (от англ. «INternational WAter DATA» – международные данные о воде), в которой выполняется анализ и контроль этих данных. При наличии пропусков в рядах осадков или стока, не заполненных на этапе 2, эти пропуски заполняются значениями, рассчитанными на основе локальных регрессионных уравнений, как это рекомендовано Всемирной Метеорологической Организацией [1]. Важно заметить, что в некоторых случаях данные об осадках могут быть получены при помощи гидродинамических моделей погоды (NWP); дальнейшие процедуры при этом не меняются. Прогнозы, выпущенные на основе таких данных, имеют чуть большую заблаговременность и несколько меньшую точность, однако они могут быть весьма эффективными для средних водосборов, поскольку в этом случае пространственная и временная неопределенность выпадения осадков нивелируется.

На четвертом этапе выполняется текущая рекалибровка используемой гидрологической модели. Этот этап нуждается в специальных комментариях, поскольку обычно калибровка модели выполняется крайне редко (или даже единожды!), а найденные параметры должны проходить процедуру валидации [1]. Как правило, калибровка модели основана на оптимизации (минимизации) того же критерия, который используется при валидации модели и параметров. Такой порядок рекомендован ВМО [1] и принят всеми гидрометслужбами мира. Авторы же данной работы предлагают – по крайней мере, в порядке научной дискуссии! – несколько модифицировать его, используя новейшие разработки в области автоматической калибровки оперативных гидрологических моделей, позволяющие выполнять эту процедуру быстро и эффективно [10-12]. По нашему мнению, основанному на большом объеме проведенных численных экспериментов, более эффективной является такая последовательность расчетных и прогностических процедур:

1. Получение временных рядов (обучающих выборок) длины  $L$  временных единиц (в.е.), отражающих «вход» и «выход» используемой гидрологической модели на временном интервале  $[t_1; t_L]$ , и другой необходимой информации;
2. Определение «априорного» (то есть основанного на физических свойствах моделируемого процесса или явления) набора параметров;
3. Квазилокальная калибровка прогностической модели методом SLS-E с использованием имеющихся рядов длины  $L$  в.е. (1 в.е. может составлять 10 мин, 1 час, 6 часов, 1 сутки и т.д.) [10-12];
4. Прогнозирование стока (или любого другого гидрологического процесса) на  $X$  в.е. вперед (этап 5 на рисунке 1);
5. Оценивание точности выпущенного прогноза;
6. Обновление имеющихся обучающих выборок в соответствии с временной дискретностью поступающих данных (например, на 1 в.е.):  $[t_1; t_{L+1}]$ ;

7. Рекуррентное повторение шагов 3–6 до тех пор, пока есть необходимость в выпускаемых прогнозах, например, до момента времени  $t_M$ ;
8. Эффективность методики оценивается как интегральная характеристика величин точности  $(M - L + 1)$  индивидуальных прогнозов (в соответствии с требованиями или пожеланиями потребителя прогностической информации).

Исключительно важно подчеркнуть, что **использование одного и того же критерия** точности прогнозов или эффективности прогностической методики **для калибровки модели и ее валидации** совершенно **не гарантирует наилучшего результата с практической точки зрения**. Действительно, модель, оказавшаяся оптимальной (то есть, наиболее эффективной) за период времени  $[t_1; t_2]$  может отличаться от модели, наилучшим образом описывающий прогнозируемый процесс за период времени  $[t_2; t_3]$ . Поэтому идентификация параметров модели, основанная, например, на минимизации погрешности моделирования пиков паводков или половодий  $\Delta_{peak}$ , может привести к тому, что периоды спада высоких расходов и уровней и периоды низкого стока, мало влияющие на величину  $\Delta_{peak}$ , будут смоделированы плохо. Это означает, что, например, степень увлажненности рассматриваемой территории перед началом очередного паводка будет задана неверно, поэтому этот паводок, который вполне может оказаться катастрофическим, также будет спрогнозирован неверно. В строгом смысле слова, говорить об оптимальности модели для прогнозирования данного катастрофического явления можно лишь постериорно: даже если исследуемая модель блестяще описала все предыдущие паводки, она может подвести при прогнозировании следующего. Поэтому при калибровке модели необходимо помнить, что **метод калибровки, вид целевой функции и выбранные обучающие выборки должны обеспечивать максимально точное отражение разных фаз гидрологического режима** (включая подъем уровней, пик паводка или половодья, спад уровней и низкий сток) **при различном порядке их чередования** (например, единичный паводок после засухи, серия из нескольких паводков и т.д.). Именно по этой причине наиболее перспективным видом целевой функции является мультимасштабная целевая функция MSOF (от англ. «multi-scale objective function»), предложенная В. И. Корнем с целью сымитировать такой «многомасштабный» характер «ручной» калибровки и отразить разные частоты стока. В проведенных экспериментах была использована целевая функция, отражающая дисперсию погрешностей относительно разных периодов осреднения:

$$J = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_k} \right)^2 \sum_{i=1}^{m_k} (q_{o,k,i} - q_{s,k,i}(X))^2}, \quad (1)$$

где  $q_{o,k,i}$  – измеренные и смоделированные расходы воды, осредненные за интервал времени  $k$ ,  $\sigma_k$  – среднеквадратические отклонения расхода воды масштаба  $k$ ,  $n$  – общее число масштабов,  $m_k$  – число элементов каждого масштаба  $k$ .

Для калибровки американских и японских водосборов использовался критерий MSOF с часовым, суточным, недельным и месячным масштабами ( $k = 1, 2, 3, 4$ ). При калибровке австралийских и финских водосборов часовой масштаб был исключен ( $k = 1, 2, 3$ ). Заметим, что каждый из элементов суммы в приведенном

уравнении имеет весовой коэффициент, равный среднеквадратическому отклонению измеренных расходов соответствующих масштабов. Подобная схема «взвешивания» основана на предположении, что неопределенность моделируемого стока в пределах каждого из масштабов пропорциональна естественной изменчивости стока для этих масштабов. Другая причина использования критерия MSOF — это дополнительное сглаживание поверхности целевой функции, которое уменьшает вероятность «застревания» процесса поиска оптимума в незначительных «ямках». Необходимо подчеркнуть, что описанный вид целевой функции MSOF — это лишь частный случай некой идеализированной «всмасштабной» целевой функции ASOF (от англ. «All-Scale Objective Function»), которая отражает все возможные частоты от, например 1 часа (при 1-часовой дискретности) до количества часов, составляющих интервал  $[t_1, t_2]$  [10-12].

Итак, мы выполняем калибровку модели именно таким образом, чтобы моделируемый гидрограф максимально близко «прижимался» к фактическому, при этом оставляя читателю свободу оценивать эффективность методики так, как он считает нужным.

В нашем же случае для оценивания эффективности прогнозов использовался критерий Нэша-Сатклиффа NS (Nash–Sutcliffe) [13], значения которого приведены в таблице 1. В последнем столбце таблицы приведен показатель  $k = NS_{new} / NS_{TR}$  улучшения точности прогноза по сравнению с классической процедурой калибровки и валидации (во всех случаях временные ряды, используемые для калибровки и валидации автоматически делились в пропорции 1:2, что примерно соответствует рекомендациям Корня и Кучмента [14, 15]). Заблаговременность прогнозов варьировалась от 1 часа до +24 часов, а площадь исследуемых водосборов — от 76 км<sup>2</sup> до 1200 км<sup>2</sup>.

Как следует из таблицы, предложенный подход является весьма эффективным способом фонового прогнозирования стока с малых и средних водосборов.

Таблица 1

## Значения критерия Нэша-Сатклиффа для тестовых водосборов (на независимом материале)

Страна	Число водотоков	NS	k
Австралия	12	0,89	1,24
США	44	0,84	1,34
Финляндия	4	0,77	1,18
Япония	8	0,90	1,37
Средние показатели		0,85	1,28

Представленные исследования выполнялись в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)» (проект № 2.1.1/3962 «Автоматизированная система краткосрочного прогнозирования паводков и половодий») и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (проект № П1103 «Разработка технологий прогнозирования катастрофических наводнений на реках Северо-запада Российской Федерации и методологии принятия управленческих решений»).

### Литература

1. Guide to Hydrological Practices. Fifth edition [Text] / World Meteorological Organization.—Geneva.—WMO No. 168.—1994.—739 p.
2. Руководство по гидрологическим прогнозам, т. 2: Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках [Текст] / Л.: Гидрометеиздат, 1989.— 246 с.
3. Seo, D.-J. Real-time variational assimilation of hydrologic and hydrometeorological data into operational hydrologic forecasting [Text] / D.-J. Seo, V. Koren, L. Cajina // Journal of Hydrometeorology.—2003.—No. 4.—P.627—641.
4. Официальный веб-сайт Метеорологической службы Великобритании [Электронный ресурс] // UK Met Office.—Exeter.—Режим доступа: <http://www.metoffice.gov.uk/>
5. Официальный веб-сайт Геологической службы США [Электронный ресурс] // USGS: Sunrise Valley Drive Reston, VA.— point of access: <http://waterdata.usgs.gov/nwis/rt>.
6. Официальный веб-сайт Национальной Службы Погоды США [Электронный ресурс] // U.S. NOAA National Weather Service.—Silver Spring.—Режим доступа: [http://www.nws.noaa.gov/oh/rfcddev/docs/VAR\\_wgrfc\\_doh.pdf](http://www.nws.noaa.gov/oh/rfcddev/docs/VAR_wgrfc_doh.pdf)
7. Официальный веб-сайт Метеобюро Правительства Австралии [Электронный ресурс] // Auastralian Government Bureau of Meteorology.—Melbourne.—Режим доступа: <http://www.bom.gov.au>
8. Официальный веб-сайт Экологического управления Финляндии [Электронный ресурс] // Helsinki.—Режим доступа: <http://www2.ymparisto.fi/scripts/oiva.asp>
9. Официальный веб-сайт Японского метеорологического агентства [Электронный ресурс] // Токио.—Режим доступа: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
10. Kuzmin, V., Seo, D.-J., Koren, V. Fast and efficient optimization of hydrologic model parameters using a priori estimates and stepwise line search // Journal of Hydrology, vol. 353, iss. 1–2, 2008, pp. 109–128.
11. Кузьмин, В.А. Основные принципы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования дождевых паводков [Текст] / В.А. Кузьмин // Метеорология и гидрология. —2009. —№ 6. —С.88–99.
12. Кузьмин, В.А. Алгоритмы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования паводков [Текст] / В.А. Кузьмин // Метеорология и гидрология.—2009. —№ 7. —С. 74–85.
13. Nash, J.E. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles [Text] / J.E. Nash, and J.V. Sutcliffe // Journal of Hydrology. —1970. —No. 10 (3), P.282–290.
14. Корень, В.И. Математические модели в прогнозах речного стока [Текст] / В.И. Корень. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 199 с.
15. Кучмент, Л.С. Математическое моделирование речного стока [Текст] / Л.С. Кучмент. —Л.: Гидрометеиздат, 1972. —191 с.