

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.

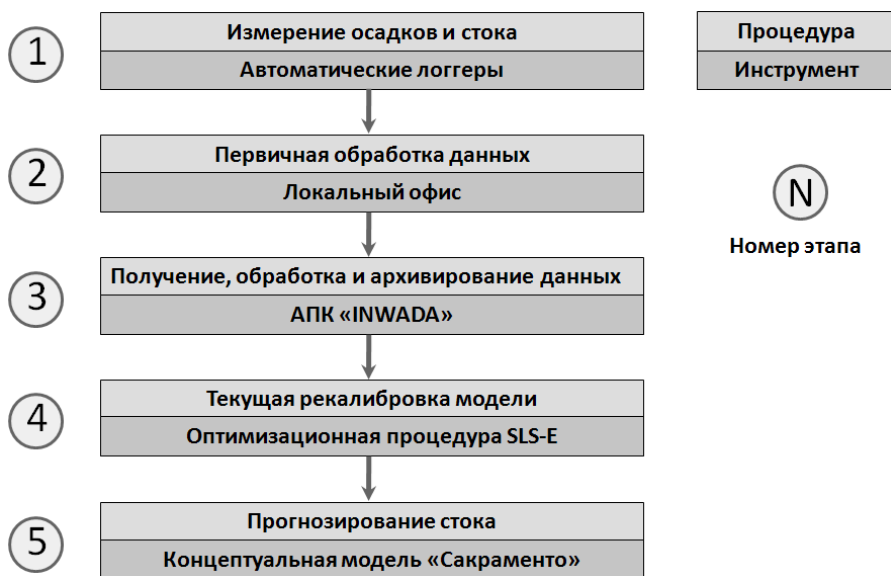


Рис. 1 – Принципиальная схема системы фонового прогнозирования стока

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 Δ_{peak} , может привести к тому, что периоды спада высоких расходов и уровней и периоды низкого стока, мало влияющие на величину Δ_{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 , σ_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 «всегомасштабной» 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 км² до 1200 км².

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
7. Официальный веб-сайт Метеобюро Правительства Австралии [Электронный ресурс] // Australian 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.