

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА С ЭЛЕМЕНТАМИ ФРАКТАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Е.В. Гайдукова, М.Е. Суслов

Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: oderuit@mail.ru

Рассматривается возможность использования методики фрактального диагностирования при проведении краткосрочного прогнозирования речного стока. Апробация разрабатываемого подхода произведена на гидрометеорологических данных водосборов, отличающихся условиями формирования стока и расположенных в различных частях Северо-Западного района РФ. Целью исследования является установление целесообразности использования рассматриваемого подхода и проверка его работоспособности на примере рек с различными характеристиками водосбора. Поверочные прогнозы проводятся с заблаговременностью сутки. Фрактальное диагностирование производится на периоде, предшествующем дате выпуска прогноза, в результате чего делается выбор оптимальной прогностической модели на период заблаговременности. Получено, что предлагаемая методика дает положительные результаты прогноза в определенные фазы осенних паводков и весеннего половодья.

Ключевые слова: фрактальная размерность; порядок модели; прогноз; расход воды; эффективность методики.

SHORT-TERM RIVER FLOW FORECASTING WITH ELEMENTS OF FRACTAL DIAGNOSIS

E.V. Gaidukova, M.E. Suslov

*Russian State Hydrometeorological University (RSHU),
St. Petersburg, Russia, e-mail: oderuit@mail.ru*

The possibility of using fractal diagnostic technique when carrying out short-term forecasting of river flow is being considered. The developed approach was tested on hydrometeorological data from catchments that differ in the conditions of runoff formation and are located in different parts of the North-Western region of Russia. The purpose of the study is to establish the feasibility of using the approach under consideration and test its performance using the example of rivers with different catchment characteristics. Verification forecasts are carried out one day in advance. Fractal diagnostics are performed in the period preceding the forecast release date, resulting in the selection of the optimal forecast model for the lead time. It was found that the proposed method gives positive forecast results in certain phases of autumn floods and spring floods.

Keywords: fractal dimension; model order; forecast; water discharge; effectiveness of the technique.

Введение

Гидрологические прогнозы имеют большое значение для управления хозяйственной деятельностью и ее оптимизации, позволяют спланировать работы во время строительства, эксплуатации и ремонта гидротехнических сооружений. В сфере гидроэнергетики прогнозирование режима стока рек помогает в регулировании функционирования гидроузлов и при выработке электроэнергии на гидроэлектростанциях. В связи с этим необходимо иметь эффективные прогностические методы и методики, позволяющие получать достоверные прогнозы речного стока.

Цель исследования заключается в разработке прогностического подхода, который включает методику краткосрочного прогнозирования речного стока и вычисление фрактальной размерности, указывающей на порядок прогностического уравнения.

Материалы и методы

Для достижения цели исследования были решены следующие задачи: сформирована база исходных данных гидрологических и метеорологических величин по гидрологическим ежегодникам и данным опубликованным в открытом доступе; выпущены поверочные прогнозы расходов воды в период весеннего половодья и осенних паводков с применением математических моделей первого и второго порядка с предварительным выбором порядка модели по фрактальной размерности рядов стока; проанализированы полученные результаты; определена эффективность предлагаемого подхода.

Для апробации подхода были выбраны 5 гидрологических постов в разных частях Северо-Западного региона Российской Федерации с различными условиями формирования стока: в восточной части р. Пинега, д. Засурье; р. Поной, с. Краснощелье – в северной части, где на формирование стока особое влияние оказывает озерность территории; р. Тихвинка, д. Горелуха – на территории Ленинградской области; р. Ловать, г. Холм – в южной части Северо-Западного региона; р. Великая, г. Опочка – на юго-западе. Расположение гидрологических постов показано на рис. 1, а.

По каждому из этих створов были собраны данные о среднесуточных расходах воды за 2019 год, а также данные о расходах в период весеннего половодья на створе р. Пинега, д. Засурье с 2008 по 2019 год. Пример гидрографа представлен на рис. 2.

Также была собрана метеорологическая информация: среднесуточная температура воздуха, ежедневные осадки и данные по снегозапасам для расчетов в период весеннего половодья. Для сбора этих данных использовались метеорологические станции: Сура, Старая Русса, Краснощелье, Тихвин и Пушкинские Горы (см., рис. 1, б). Основными критериями при

подборе метеорологических станций являлись репрезентативность данных. Станции подбирались как можно ближе к центру водосбора исследуемой реки. Далее сопоставляя данные осадков и расходов воды на каждом створе, находились параметры времени добегания и коэффициент корреляции между стоком и осадками для определения стокоформирующих осадков.

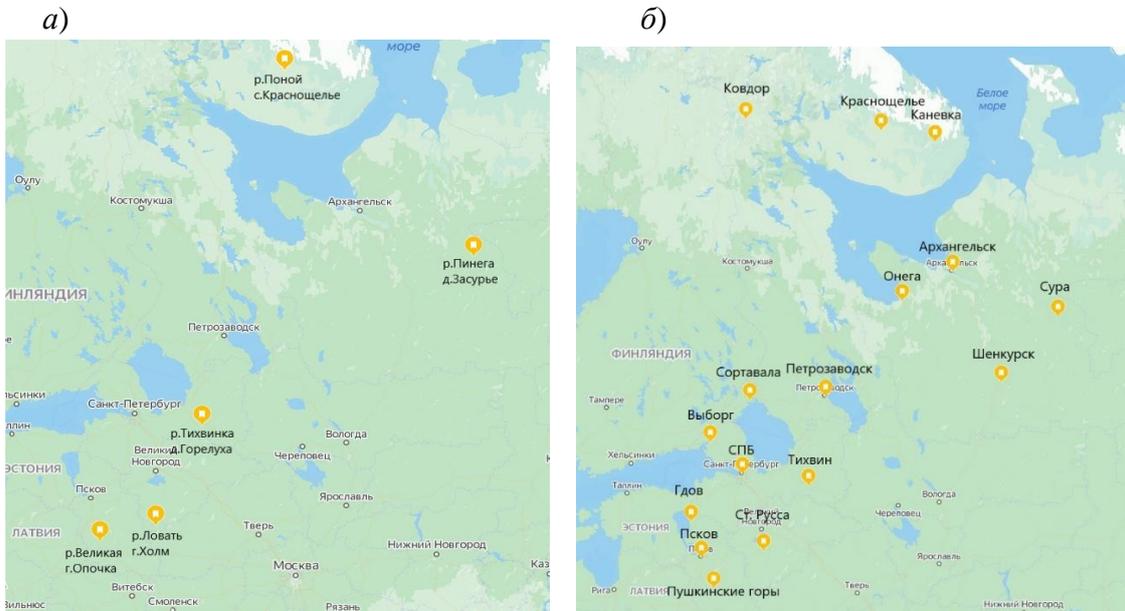


Рис. 1. Расположение гидрологических постов (а) и метеорологических станций (б)

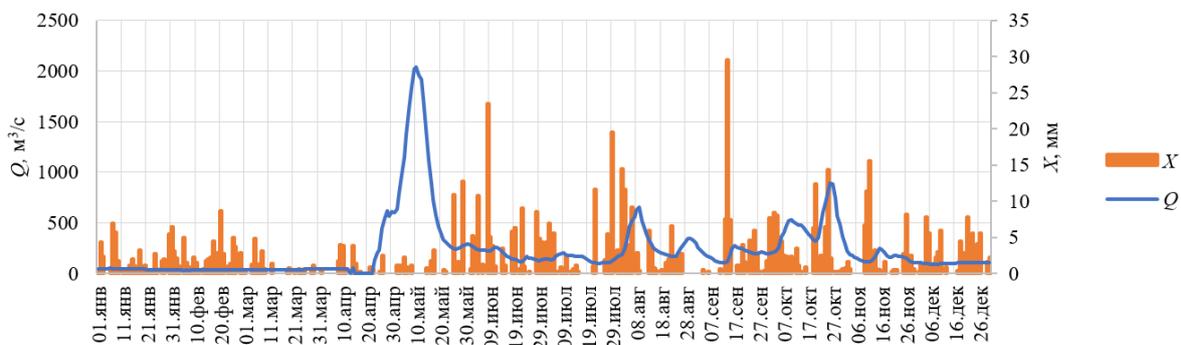


Рис. 2. Гидрограф р. Пинега – д. Засурье, 2019 год

Фрактальная диагностика является первым этапом в построении математической модели объекта. Возможное применение фрактальных характеристик для целей диагностирования временных рядов связано с тем, что графики рядов замеров речного стока имеют самоподобную фрактальную структуру. Установление факта фрактальности ряда позволяет установить характерные его особенности и спрогнозировать поведение в дальнейшем.

Над изучением сущности фрактальности и ее свойств занимались такие ученые как Б. Мандельброт, Х. Херст, Э. Лоренц, Е. Федер [1].

Знание фрактальной размерности аттракторов помогает оценить минимальное количество переменных, нужных для описания изучаемого процесса, т.е. размерность вложения. Математик Флорис Такенс изучал возможность нахождения размерности аттракторов d в фазовом пространстве n по временному ряду только одного компонента аттрактора. Он доказал, что этот компонент несет информацию обо всех остальных переменных, из которых состоит аттрактор. То есть каждый параметр влияет на совокупность всех остальных параметров. Почти всегда работает закон $d < n$, который математически объясняется некомпактностью фрактала [2]. Следовательно, проведя вычисление по данным временного ряда фрактальной размерности, следующее целое число можно считать минимальным количеством переменных, которые понадобятся для построения модели. Это число определяет наименьшее число дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих динамику изучаемой системы.

Для сравнения фрактальных свойств различных процессов наиболее распространенным в настоящее время является метод Херста, который заключается в том, что для анализа временных рядов используется безразмерный показатель, показывающий отношение размаха R накопленного отклонения от среднего к среднеквадратическому отклонению S (R/S) [3].

Так же используется функциональный метод, который заключается в том, чтобы в определенной последовательности значений определить наличие функциональной зависимости, которая бы описывала исследуемый временной ряд [3]. Метод ориентирован на выявление и изучение функций объектов или систем. Подразумевается, что между y_n членом временного ряда и предыдущими значениями y_{n-1} , y_{n-2} , y_{n-3} и т. д. должна существовать функция f . Внутри этой последовательности y_n выбирается еще одна последовательность длиной n и рассматриваются все возможные векторы.

Результаты исследования

Фрактальная диагностика производилась на периоде в 15 суток, предшествующем дате выпуска прогноза, в результате чего делался выбор оптимальной прогностической модели на период заблаговременности. Прогнозы проводились с заблаговременностью в одни сутки. Использовались модели в виде дифференциальных уравнений первого и второго порядков [4].

В таблице представлены примеры результатов прогнозирования стока в период осеннего паводка по модели первого порядка, второго порядка и погрешности прогнозов этих моделей (р. Великая – г. Опочка). Так же представлены результаты фрактальной диагностики и оправдываемость [5] ее применения для прогноза на каждые сутки.

По всем расстраиваемым водосборам получены следующие результаты:

– на реке Пинеге створ д. Засурье модель 1-го порядка дала прогноз большей оправданности, чем модель второго порядка. В период весеннего половодья на этом же створе на фазе подъема половодья оправдываемость методики составила около 80 % и лучше справилась модель 2-го порядка, а в фазу спада половодья модель 1-го порядка оказалась точнее.

– на реке Ловать город Холм модель первого порядка более корректно отразила данные. Даты с максимальными значениями расходов воды совпали, однако пиковые значения оказались выше при применении и той, и другой модели. Оправдываемость методики прогноза с элементами фрактального диагностирования по расчетам на створе составила 50 %.

– на реке Поной пост с. Краснощелье прогноз по модели второго порядка показывает, что фактические значения расхода воды в среднем на 1 сутки опережают прогнозные, но максимальные значения совпадают с фактическими при прогнозе по обеим моделям.

– на реке Тихвинка д. Горелуха за период осенних паводков как при прогнозировании с помощью модели первого порядка, так и второго, наблюдается высокая оправдываемость прогноза. Но обе модели показали завышенное значение на момент прохождения пика паводков.

– при рассмотрении реки Великой г. Опочка методика показала эффективность в 70 % случаев за период осеннего паводка.

Оправдываемость методики прогнозирования с учетом фрактальной размерности ряда в зависимости от исследуемой реки за полный период осенних паводков составила от 35 до 70 %. При анализе результата и рассмотрении отдельных фаз осенних паводков, можно сказать, что в период спада уровня, методика предоставляет результат с оправдываемостью от 65 до 90 %. Результат прогнозирования в период весеннего половодья, на единственном створе, где была применена фрактальная диагностика, показал оправдываемость в 45 % за весь период весеннего половодья. Нужно отметить, что диагностика хорошо справилась с фазой подъема и процент оправдываемости методики за этот период составил 90 %.

Заключение

Основным результатом исследования является разработка и оценка эффективности метода краткосрочного прогнозирования, включающего фрактальную диагностику. Апробация метода производилась на реках Северо-Западного федерального округа.

Результаты апробации разрабатываемого подхода на р. Великая – г. Опочка

Дата	$Q_{ф}$, м ³ /с	$Q_{пр}$ по модели 1 порядка, м ³ /с	Погреш- ность, %	$Q_{пр}$ по модели 2 порядка, м ³ /с	Погреш- ность, %	Порядок мо- дели по фрак- тальной диа- гностике	Оправды- ваемость методики
10.окт	17,4	20,1	-15,46	17,9	-2,90	2	+
11.окт	17,7	17,0	4,09	17,9	-1,31	2	+
12.окт	18,0	19,3	-6,99	18,4	-1,95	2	+
13.окт	18,6	17,7	4,89	19,0	-2,17	2	+
14.окт	18,3	19,8	-8,35	18,4	-0,53	1	-
15.окт	18,6	17,8	4,17	18,9	-1,52	1	-
16.окт	19,7	19,0	3,33	20,4	-3,47	1	+
17.окт	20,3	20,7	-2,17	20,9	-2,94	1	+
18.окт	20,6	20,5	0,48	21,0	-2,18	1	+
19.окт	22,0	21,7	1,25	22,9	-3,91	1	+
20.окт	23,8	23,5	1,25	24,8	-4,39	1	+
21.окт	25,0	24,9	0,27	26,0	-3,83	1	+
22.окт	25,7	25,4	1,25	26,4	-2,88	1	+
23.окт	25,7	25,4	1,25	26,1	-1,64	1	+
24.окт	25,4	25,1	1,25	25,3	0,29	1	-
25.окт	24,3	24,0	1,25	23,3	3,96	1	+
26.окт	24,3	24,1	0,92	24,4	-0,27	1	-
27.окт	24,0	24,0	0,15	23,8	0,85	2	-
28.окт	24,0	23,8	0,83	24,1	-0,38	2	+
29.окт	24,7	24,6	0,51	25,3	-2,57	2	-
30.окт	25,3	25,1	0,93	25,8	-1,94	2	-
31.окт	25,6	25,4	0,93	25,9	-1,15	1	+
01.ноя	25,7	25,8	-0,25	25,9	-0,67	2	-
02.ноя	27,0	26,7	1,02	27,9	-3,50	2	-
03.ноя	28,0	28,3	-1,22	29,0	-3,68	2	-
04.ноя	29,4	35,1	-19,50	31,1	-5,74	2	+
05.ноя	30,9	39,7	-28,42	32,8	-6,07	2	+
06.ноя	32,4	31,5	2,75	33,6	-3,77	2	-
07.ноя	35,0	35,1	-0,22	37,4	-6,93	2	-
08.ноя	38,3	38,1	0,41	41,5	-8,39	1	+
09.ноя	41,2	41,6	-1,07	44,1	-7,15	1	+
10.ноя	45,2	45,4	-0,37	49,4	-9,39	1	+
11.ноя	45,2	46,7	-3,29	46,9	-3,68	1	+
12.ноя	49,5	48,9	1,25	51,9	-4,86	1	+
13.ноя	56,5	55,9	1,14	62,5	-10,57	1	+
14.ноя	58,5	57,8	1,25	61,1	-4,38	1	+

Прогнозирование расходов воды на каждом створе проводилось по моделям первого и второго порядка в период осенних паводков и весеннего

половодья. Сравнивались фактические и прогнозные значения, полученные по каждой модели. Для всех исследуемых рек была проведена фрактальная диагностика за период осенних паводков, а так же для створа р. Пинега, д. Засурье, для периода весеннего половодья.

Оправдываемость методики прогнозирования с учетом фрактальной размерности ряда в зависимости от исследуемой реки за полный период осенних паводков составила до 70 %. При анализе результата и рассмотрении отдельных фаз паводков, можно сказать, что в период спада уровня методика предоставляет результат с 80 – 90 % оправдываемостью.

Библиографические ссылки

1. Тугой И. Фракталы и мир вокруг нас [Электронный ресурс] – URL: <http://www.ghcube.com/fractals/general.html>, 2000.
2. Гайдукова Е. В. Фрактальная диагностика в моделировании гидрологических процессов. – СПб: Астерион, 2017. – 98 с.
3. Лоскутов А. Ю. Анализ временных рядов // Курс лекций. – 113 с.
4. Эспития С.Э.Ф., Гайдукова Е.В., Коваленко В.В. Краткосрочный прогноз расходов воды на реках Колумбии с использованием фрактальной диагностики // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, 2017. № 47. – С. 16–24.
5. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. – СПб.: изд-во РГГМУ, 2007.– 435 с.