

Разработаны классы поддержки функциональности системы, базовый класс для обеспечения коммуникаций и работы с сетью по TCP/IP протоколам. Проектные решения представлены диаграммами прецедентов, классов, компонентов, а также диаграммами развертывания компонентов в сетевой структуре узлов.

Решения ориентированы на реализацию на персональных компьютерах с операционной системой Windows. Для паковки-распаковки сообщений, обмена данными использован формат JSON, база данных размещена на SQL Server, сетевое программирование проводилось на основе открытой кросс-платформенной библиотеки Asio (Boost.Asio) с использованием языков visual C++ и CLI C++ [3, 4] для поддержки интерфейсов, организация данных выполнялась с применением стандартных контейнеров STL.

Список литературы

1. Компьютерная игра [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Компьютерная_игра](https://ru.wikipedia.org/wiki/Компьютерная_игра). – Дата доступа: 11.09.2021.
2. Компьютерные игры [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/977059>. – Дата доступа: 11.09.2021.
3. Доусон, М. Изучаем C++ через программирование игр / М. Доусон. – СПб.: Питер, 2016. – 352 с.
4. Труб, И. И. Объектно-ориентированное моделирование на C++ / И. И. Труб. – СПб.: Питер, 2006. – 411 с.

УДК 556.16.06

ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

С. В. Сидак

*Брестский государственный технический университет, г. Брест
Научный руководитель: А.А. Волчек, доктор географических наук, профессор*

Согласно проекту Водной стратегии Республики Беларусь до 2030 г. на сегодняшний день имеется недостаточный объем научных исследований для проведения достоверной оценки дальнейшего влияния изменения климата на водные ресурсы Беларуси. Влияние изменения климата и антропогенных воздействий на гидрологические процессы выражается в нестационарности гидрологических рядов данных. Следствием этого является тот факт, что получение прогнозных оценок гидрологических характеристик проводится в условиях большой неопределенности. Особенно затруднительным является расчет экстремальных характеристик стока, представляющих наибольшие риски для экономики страны и для безопасности населения.

За последние два десятилетия парадигма гидрологического прогнозирования изменилась с детерминированной на вероятностную [1]. В ряде исследований по получению прогнозных оценок речного стока в нестационарных условиях исходят из методологического положения, состоящего в том, что только на основе вероятностных подходов возможно дать прогнозное распределение стока с большой заблаговременностью, учитывающее основные источники неопределенности.

Характер нарушения стационарности рядов инструментальных наблюдений за максимальным и минимальным стоком крупных рек Беларуси позволяет сделать вывод о том, что все ряды максимального и большинство рядов минимального стока можно рассматривать состоящими из двух последовательных стационарных участков. Согласно существующим методическим рекомендациям, в случае неоднородности исходных данных гидрологических наблюдений, когда рассматриваемый ряд состоит из неоднородных элементов гидрологического режима, эмпирические и аналитические кривые распределения устанавливаются отдельно для каждой однородной совокупности [2]. Итоговая схема моделирования предполагает построение расчетной кривой обеспеченности в виде суммы двух законов распределения с заданными весовыми коэффициентами, пропорциональными длинам выборок. В практике гидрологического моделирования такая модель имеет название «смесь распределений». В этом случае для плотности распределения $f(Q)$ и кривой обеспеченности $P(Q)$ справедливы следующие формулы:

$$f(Q) = \alpha_1 f_1(Q) + \alpha_2 f_2(Q), \quad (1)$$

$$P(Q) = 1 - \int_0^Q [\alpha_1 f_1(Q) + \alpha_2 f_2(Q)] dQ, \quad (2)$$

где $\alpha_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2}$, $\alpha_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2}$ – весовые коэффициенты, n_1, n_2 – число членов в каждой из двух однородных совокупностей. Согласно [2] весовые коэффициенты можно задать и другими способами, но необходимо выполнение условия:

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1. \quad (3)$$

Реализация вероятностного прогноза с использованием модели (1) требует последовательного решения ряда задач:

- 1) анализ «характера» нестационарности гидрологического ряда (поиск точек разладки во временных рядах);
- 2) идентификация наиболее подходящей вероятностной модели распределения речного стока для условно однородного участка [3];
- 3) учет имеющейся нестационарности в прогнозной модели.

Недостаток модели «смеси распределений» заключается в том, что данная модель больше подходит для оценки уже произошедших изменений гидрологического режима на момент прогноза, но не для получения прогнозных оценок в будущем. Причиной этого служит тот факт, что в данной модели учитываются только предыдущие состояния гидрологической системы, т.е. состояния, в которых она пребывала до момента прогноза. Но данная модель не учитывает состояние, в которое система перейдет в прогнозном периоде.

Второй недостаток состоит в назначении весовых коэффициентов модели. Назначение коэффициентов пропорционально длинам выборок однородных периодов предполагает, что вероятность пребывания гидрологической системы в прогнозном периоде в условиях формирования стока, схожих первому стационарному периоду, составляет α_1 , второму стационарному периоду – α_2 . Однако, учитывая наблюдаемое потепление климата и большую вероятность продолжения наметившейся тенденции в его изменении, вероятность того, что гидрологическая система будет находиться в условиях, схожих со вторым стационарным периодом, должна превосходить вероятность возврата к прошлому (пер-

вому) стационарному состоянию системы. В связи с этим весьма актуальной является проблема обоснованного выбора весовых коэффициентов в модели (1), которые отражали бы количественно вероятность развития гидрологической системы и условий формирования стока в прогнозном периоде по каждому условно стационарному периоду до момента прогноза. В данном исследовании оценить эту вероятность предлагается с использованием фрактального анализа гидрологических рядов [4].

Метод фрактального анализа является инструментом, позволяющим вычислять параметры, отражающие неявные, скрытые свойства гидрологических процессов и получившим в последнее время широкое развитие в самых разнообразных областях науки. Суть метода фрактального анализа состоит в том, что состояние системы, в котором она находится в настоящий момент, формируется на основе предыдущих состояний системы или процесса. В результате временной ряд на определенном промежутке является фрактальным (самоподобным). Отличительным свойством при реализации фрактального анализа (в отличие, например, от марковских цепей) является то, что в процессе анализа принимаются во внимание не только состояния системы, в которых она пребывала непосредственно до начала прогноза, но и состояние, происходившие давно относительно настоящего момента. Основной целью процесса фрактального анализа рядов расходов речного стока является установление наличия и численная оценка таких фундаментальных характеристик гидрологических рядов, как долговременная память, трендоустойчивость (персистентность) и антиперсистентность.

В теории фрактального анализа известны несколько способов исследования временных рядов и оценки их фрактальных размерностей. В гидрологических исследованиях наиболее часто используется метод, основанный на исследованиях английского гидролога Хёрста, который в начале XX в. занимался изучением уровня воды в р. Нил и доказал, что большинство естественных явлений следуют случайности на каждом последовательном шаге (представляют собой комбинацию тренд+шум). Этот метод анализа, основанный на вычислении показателя Хёрста (H), в научной литературе носит название R/S анализа [5]. Специфика метода ориентирована на анализ нелинейных колебаний, колебаний с непостоянными амплитудой и частотой. В отличие от спектрального и корреляционного анализов, метод R/S анализа не требует, чтобы рассматриваемая выборка и её подвыборки изменялись по гармоническому закону. Величина H характеризует отношение устойчивости текущей тенденции ряда (детерминированная составляющая) к уровню шума (случайная составляющая). Основным достоинством критерия Хёрста является его устойчивость к априорному распределению временного ряда и возможность достаточно просто выявить периодические и даже непериодические циклы.

Результирующее значение H колеблется от 0 до 1 и является главным показателем трендоустойчивости ряда, а также определяет цвет шума. При определенных значениях H можно просто и надежно прогнозировать течение изучаемого процесса на основе предыдущих состояний процесса. Если показатель H равен 0.5, то сигнал представляет собой случайный процесс (белый шум). Для процессов с более высоким значением H ($H > 0.5$) присуща персистентность. Это означает, что предыдущие значения ряда непосредственно повлияют на буду-

щие значения, таким образом, наступление экстремального события будет предпосылкой более высокой вероятности того, что за ним последуют другое экстремальное событие. Чем ближе значение показателя H к 1, тем больше эта вероятность. Показатель $H > 0.6$ определяет область черного шума и указывает на наличие эффекта «долговременной памяти». Более низкий показатель H ($H < 0.5$) имеет отрицательную долгосрочную зависимость и соответствует области розового шума. Таким процессам характерна антиперсистентность, т.е. значения на текущем этапе противоположно влияют на будущее поведение ряда. В этом случае появление экстремального события будет фактом того, что за ним последует другое экстремальное, но противоположное событие (например, за наводнением последует засуха). Такой ряд практически нельзя предсказать.

Для оценки области применимости прогнозной модели (1) необходимо определить максимальный временной интервал прогнозирования t_{max} . При вероятностном прогнозировании речного стока предлагается максимальному временному интервалу прогнозирования t_{max} поставить в соответствие максимальную глубину долговременной памяти l_{max} временного ряда. Глубина долговременной памяти l содержательно означает количество значений временного ряда, после которого теряется память о начальной точке. В итоге модель прогнозирования стока на период t_{max} будет иметь следующий вид:

$$f(Q) = (1 - H)f_1(Q) + Hf_2(Q). \quad (4)$$

Таким образом, предложена методика получения прогнозных оценок стока рек Беларуси в нестационарных условиях, основанная на построении прогнозной модели в виде «смеси распределений» с назначением весовых коэффициентов, учитывающих фрактальную размерность гидрологических характеристик. На основании проведенных ранее исследований, в качестве теоретической кривой распределения условно стационарного участка для описания минимального стока рек Беларуси представляется возможным использовать распределение Гумбеля, для максимального стока – распределение Вейбулла, дающие наилучшую аппроксимацию исходных данных.

Список литературы

1. Кучмент, Л. С. Развитие методов гидрологических прогнозов и смена их парадигмы / Л. С. Кучмент // Избранные труды Института водных проблем РАН: 1967-2017: В 2-х т. – М.: КУРС, 2017. – Т. 2. – С. 5–24.
2. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250). – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.
3. Волчек, А. А. Учет распределения максимальных значений речного стока при реставрации историко-культурных ценностей / А. А. Волчек, С. В. Сидак // Реставрация историко-культурных объектов как сохранение культурного наследия Республики Беларусь : сб. статей науч.-техн. семинара, Брест, 30 сентября 2020 г. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол. : под ред. Э. А. Тур [и др.]. - Брест : БрГТУ, 2020. – С. 35–39.
4. Волчек, А. А. К вопросу исследования гидрометеорологических рядов методами фрактального анализа / А. А. Волчек, С. В. Сидак // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ : тезисы докладов международной научно-практической конференции - Санкт-Петербург : РГГМУ, 2020. – С. 321–323.
5. Hurst, H.E. Long-term storage capacity of reservoirs // Trans. Am. Soc. Civ. Eng. – 1951. – №116. – P.770–808.