

Соотношение между коэффициентами C_V и C_S для среднегодовой скорости ветра в приводимом пункте принимаем по аналогу: $C_S = 2C_V$.

Искомые параметры приведенного ряда: $\bar{V}_N = 2,23$ м/с; $C_{V_{a,N}} = 0,06$; $C_S = 2C_V$.

Данный прием позволяет восстановить пропуски в рядах наблюдений, а также привести ряды к единому расчетному периоду для получения сопоставимых результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Волчек, А. А. Гидрологические расчеты : учеб. пособие / А. А. Волчек. – М. : КНОРУС, 2021. – 418 с.

УДК 556.16.06

**А. А. ВОЛЧЕК, О. П. МЕШИК, С. И. ПАРФОМУК, С. В. СИДАК,
М. В. БОРУШКО, Ю. П. ГОРОДНЮК, А. В. ЕВКОВИЧ**

Беларусь, Брест, БрГТУ

E-mail: volchak@tut.by

ПОДХОДЫ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РЕЧНОГО СТОКА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

За последние несколько десятилетий разработано большое количество методов прогнозирования речного стока. В основу большинства из них положены модели физического анализа и модели управления данными.

Физические модели основаны на физическом гидрологическом динамическом процессе, объединяющем пространственно-временное распределение осадков, метеорологические условия и свойства подстилающей поверхности. Сложность процессов формирования стока и взаимодействия речного стока с различными факторами, такими как климат, географическая среда и антропогенное воздействие, приводит к трудности построения гидрологических моделей с высокой точностью. Помимо сложности моделирования гидрологического процесса, требование большого объема данных также ограничивает применение физических моделей.

Модели управления данными направлены на изучение характеристик самих данных, а также взаимосвязи между входами и выходами моделей (модели регрессии, анализ временных рядов, искусственные нейронные сети, нечеткие алгоритмы и др.).

Хотя в последние десятилетия наблюдается значительное совершенствование физических моделей, они все еще ограничены в настоящее время отсутствием понимания физики процесса. Такую проблему можно преодолеть с помощью применения искусственных нейронных сетей, которые могут производить высокоточные симуляции физических систем, даже если основные физические отношения неизвестны. В гидрологии в последнее десятилетие становится все более популярным особый тип искусственной нейронной сети, известный как сеть с долгой краткосрочной памятью (Long short-term memory, LSTM).

В связи с изменением климата и увеличением антропогенной нагрузки на гидрологический режим рек многолетние ряды характеристик речного стока демонстрируют нестационарность [1]. Наличие нестационарности в рядах данных гидрологических наблюдений приводит к значительным ошибкам прогноза при использовании традиционных детерминированных методов прогнозирования.

Чтобы преодолеть недостатки вышеперечисленных моделей и получить более точные результаты в прогнозировании гидрологических рядов, в современных исследованиях нестационарных процессов наметилась тенденция синтеза различных методов исследования рядов с целью получения лучших характеристик комбинированной модели (гибридное моделирование).

Для устранения нестационарности ряда должна быть применена технология разложения ряда перед прогнозированием. Поэтому во многих исследованиях доказана эффективность использования гибридных моделей, основанных на принципе декомпозиции и ансамбля.

Основная цель декомпозиции временного ряда – упростить процесс прогнозирования, а результаты ансамбля используют для оценки эффективности прогноза. Важным моментом при подборе гибридной модели является выбор подходящего метода декомпозиции. Большую популярность при исследовании нестационарных временных рядов получил метод эмпирической модовой декомпозиции (empirical mode decomposition, EMD) [2]. EMD представляет собой инновационную методику обработки данных, эффективно работающую как с нелинейными, так и с нестационарными данными. Данным методом можно разложить гидрологический временной ряд на интерпретируемые аддитивные составляющие, не требуя при этом стационарности ряда и знания типа тренда, а также сведений о наличии в ряде периодических составляющих. Ключевое преимущество этого метода разложения заключается в его уникальном механизме анализа: в отличие от классических методов вроде преобразования Фурье, сингулярного спектрального анализа и вейвлет-преобразования, EMD

не требует предварительного задания функции разложения. Вместо этого метод адаптивно извлекает внутренние модовые функции непосредственно из анализируемых данных. Такая особенность делает EMD особенно ценным инструментом для исследования сложных временных рядов, позволяя преодолеть ограничения, присущие традиционным методам спектрального анализа.

Наибольшую популярность в зарубежных исследованиях при прогнозировании речного стока приобретают гибридные модели EMD-ARIMA и EMD-LSTM, основанные на совместном использовании метода эмпирической модовой декомпозиции (empirical mode decomposition, EMD), модели авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (autoregressive integrated moving average, ARIMA) и долгой краткосрочной памяти (Long short-term memory, LSTM) [3; 4]. EMD используется для разложения исходного нестационарного ряда на серию модовых функций (intrinsic mode functions, IMF) и остаток. К каждому из этих компонентов может быть применена ARIMA-методология или LSTM.

Основными этапами получения прогнозных оценок с помощью гибридной модели EMD-ARIMA (EMD-LSTM) являются (рисунок):

- 1) последовательные операции по выделению из исходного временного ряда модовых функций, начиная с высокочастотных, и остатка;
- 2) разработка подходящей модели ARIMA (LSTM) для каждой IMF-функции и остатка;
- 3) проведение общих вычислений для прогнозирования исходного временного ряда на основе прогноза каждой подсерии;
- 4) сравнение производительности гибридной модели EMD-ARIMA (EMD-LSTM) со стандартной моделью ARIMA (LSTM).

Модели EMD-ARIMA и EMD-LSTM представляют собой мощный инструмент для анализа и прогнозирования нестационарных временных рядов данных гидрологических наблюдений. Использование рассматриваемых моделей открывает широкие возможности для дальнейшего изучения гидрологического режима.

Практическое применение результатов может быть направлено на выявление краткосрочных и долгосрочных изменений водного режима, анализ синхронности колебаний речного стока на территории Беларуси, создание прогностических моделей гидрологических процессов, разработку прогнозных оценок стока рек. Это позволит существенно улучшить качество гидрологических исследований и повысить точность прогнозирования водных ресурсов.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (договор № X25КИ-036).

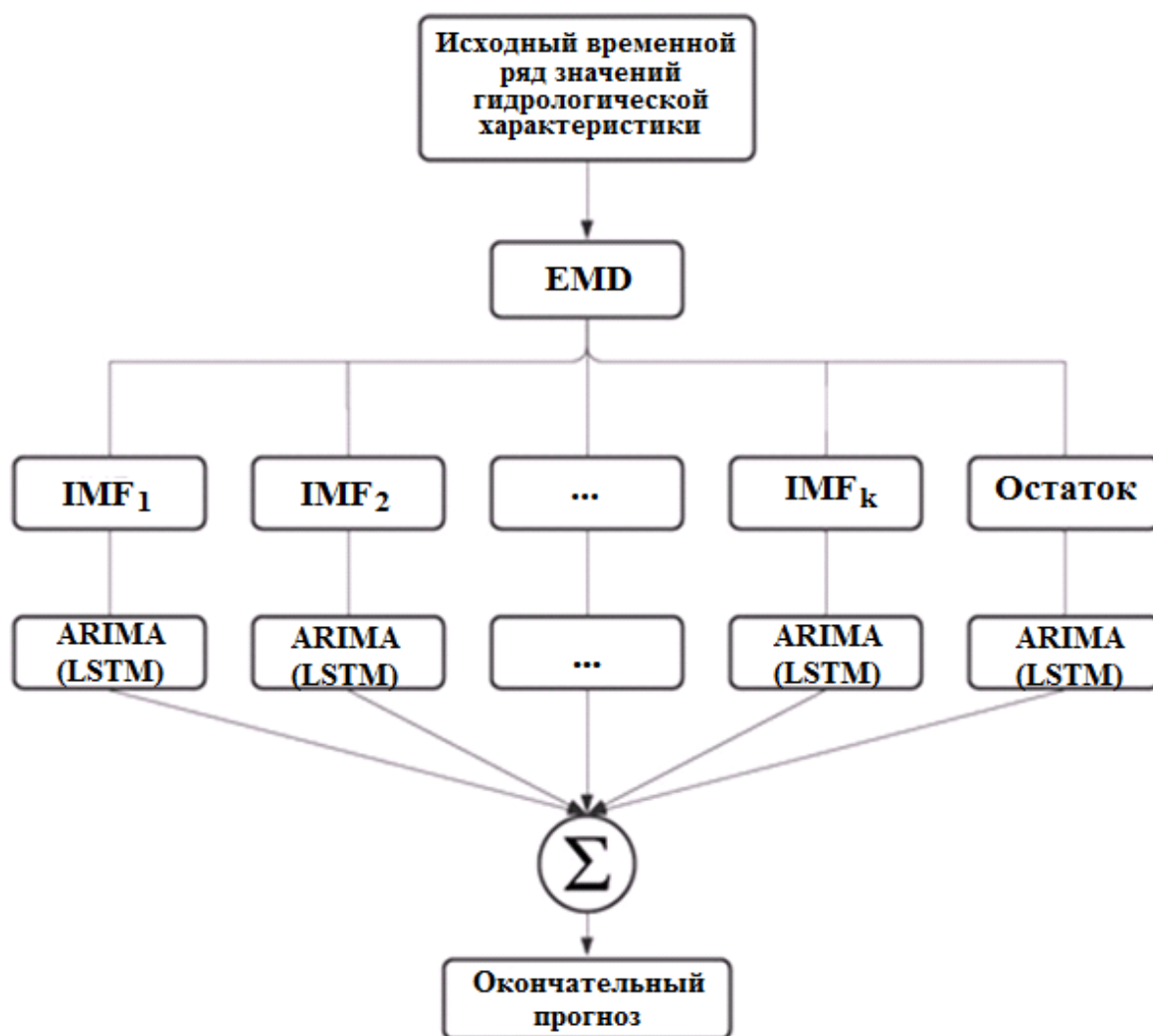


Рисунок – Блок-схема гибридной модели EMD-ARIMA (EMD-LSTM)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Волчек, А. А. Многолетняя изменчивость стока рек Беларуси в условиях изменения климата и антропогенных воздействий / А. А. Волчек, С. В. Сидак, С. И. Парфомук // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию Брест. гос. техн. ун-та и 50-летию фак. инженер. систем и экологии, Брест, 7–8 окт. 2021 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: А. А. Волчек [и др.]. – Брест, 2021. – С. 101–113.

2. Волчек, А. А. Прогнозные оценки речного стока на основе гибридной модели EMD-ARIMA / А. А. Волчек, С. В. Сидак // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ : сб. тез. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Рос. гос. гидрометеорол. ун-та, Санкт-Петербург, 22–24 окт. 2020 г. – СПб. : РГГМУ, 2020. – С. 318–320.

3. Волчек, А. А. Прогнозные оценки максимальных расходов воды реки Днепр в створе города Речицы / А. А. Волчек, С. И. Парфомук, С. В. Сидак // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – № 1 (124). – С. 69–76.

4. Rainfall-runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks / F. Kratzert, D. Klotz, C. Brenner, S. Karsten // Hydrology and Earth System Sciences. – 2018. – Vol. 22. – P. 6005–6022.

5. Волчек, А. А. Выявление скрытых периодических составляющих в гидрологических рядах / А. А. Волчек, С. В. Сидак, С. И. Парфомук // Материалы I Белорусского географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества, Минск, 8–13 апр. 2024 г. В 7 ч. Ч. 1. Современные проблемы гидрометеорологии / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: Е. Г. Кольмакова (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2024. – С. 76–80.

УДК 556.(476.1)

**А. А. ВОЛЧЕК, С. И. ПАРФОМУК, Н. Н. ШЕШКО,
Н. Н. ШПЕНДИК, С. В. СИДАК**

Беларусь, Брест, БрГТУ

E-mail: volchak@tut.by

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В КОЛЕБАНИЯХ СТОКА РЕК БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

В условиях глобальных изменений климата происходит трансформация водного баланса и, как следствие, гидрологического режима водных объектов. Результаты анализа многолетних данных наблюдений за стоком рек Беларуси позволяют говорить о наличии незначительного снижения годового стока [1]. При этом за последние 20–30 лет сформировался тренд на снижение среднегодового стока, значимый вклад в который обеспечили маловодные годы за последнее десятилетие. Более яркая тенденция в изменении стока наблюдается для максимальных его значений, что выражается в устойчивом тренде на всем протяжении доступных данных и особенно на современном этапе. Данные изменения наблюдаются на фоне повышения зимнего стока, что в первую очередь обусловлено участвовавшими зимними оттепелями, и, как следствие, снижением запаса влаги в виде снежного покрова и почвенного льда [2].