

УДК 556.535.5

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПОДХОДОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ УРОВЕННОГО РЕЖИМА РЕКИ МАРМАРИК

© 2024 г. А. Э. Сумачев^{1,*}, Е. В. Гайдукова^{2,**}, В. Г. Маргарян^{3,***}, А. М. Седракян⁴

Поступило 16.11.2023 г.

После доработки 05.02.2024 г.

Принято к публикации 07.02.2024 г.

В статье рассмотрен опыт применения метода обучения искусственных нейронных сетей и других вероятностных подходов при прогнозировании уровня режима реки Мармарик с различной заблаговременностью. Выявлено, что при долгосрочном прогнозировании уровней воды на р. Мармарик по п. Агавнадзор целесообразно ориентироваться на оценку математического ожидания случайного процесса. При краткосрочном прогнозировании уровней воды на один срок вперёд (12 часов) следует ориентироваться на значение уровня воды, приходящиеся на дату выпуска прогноза, стандартная ошибка такого прогноза составляет 5 см. Для прогноза уровня воды на 24 часа вперёд целесообразна разработка нейросетевых моделей прогнозирования с учётом развития ситуации на р. Гомрагет – п. Меградзор.

Ключевые слова: прогнозирование, искусственные нейронные сети, уровень воды, краткосрочные прогнозы, долгосрочные прогнозы

DOI: 10.31857/S2686739724060202

ВВЕДЕНИЕ

Разные отрасли хозяйства, и в первую очередь такие, как гидроэнергетика и сельское хозяйство, нуждаются в прогнозах водного режима с различной заблаговременностью. Прогнозы позволяют наиболее рационально использовать водные ресурсы страны, а также заблаговременно подготовиться к опасным гидрологическим явлениям и этим предупредить или существенно уменьшить ущерб, причиняемый ими народному хозяйству [1, 2]. К наиболее сложным речным водосборам, с точки зрения, прогнозов относятся водосборы горных и полугорных рек, отличающиеся спецификой формирования стока, связанной с высотной поясностью, свойствами подстилающей поверхности, уклонами склонов и русловой сети.

Существующие онтологические подходы в прогнозах стока горных и полугорных рек можно разделить на следующие группы [3]: методы, основанные на определении составляющих водного баланса; методы, опирающиеся на концептуальные модели формирования речного стока; методы, использующие физико-статистические зависимости характеристик речного стока от гидрометеорологических факторов; методы, основанные на решении математических моделей.

В практике оперативного прогноза стока горных рек распространены разные методы. Они могут опираться либо на концептуальные модели формирования стока, где основные процессы стокообразования описываются с помощью упрощённых полуэмпирических уравнений, либо на физико-статистические зависимости характеристик паводочного стока от метеорологических и гидрологических факторов [4]. Пример концептуальной модели приведён в работе [5], в которой эта модель используется для краткосрочного прогноза стока малых высокогорных притоков Кубани. В работах [6, 7] показана эффективность использования физико-статистических методов прогнозов на горных реках. Методы, основанные на математических моделях, недостаточно распространены для прогноза стока

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

⁴Национальный Политехнический Университет Армении, Ереван, Армения

*E-mail: a-sumachev@mail.ru

**E-mail: oderiut@mail.ru

***E-mail: vmargaryan@ysu.am

****E-mail: asedrakyan@seua.am

горных рек, так как относительно сложны в получении и использовании.

В работе [8] была рассмотрена возможность прогнозирования расходов воды (Q) реки Мармарик с использованием уравнения кинематической волны. Полученные результаты при проведении поверочных прогнозов свидетельствуют о достаточно высоком качестве выпускаемых прогнозов расходов воды.

При этом стоит отметить целесообразность прогнозирования не только расходов, но и уровней воды (H), как основной характеристики возможного затопления территории. Прогнозирование уровней воды может выполняться различными методами в зависимости от желаемой заблаговременности прогноза и данных, доступных для прогнозирования. Достаточно большое количество методик прогнозирования, особенно высших уровней воды, основаны на связи между расходами и уровнями воды. Однако, расходы воды, в реальных условиях, определяются в конце года по годовой зависимости $Q = f(H)$ и их использование в оперативной практике прогнозирования редко является целесообразным, лишь в условиях устойчивого русла уровни воды могут быть спрогнозированы по значениям прогнозного расхода воды с использованием многолетней зависимости расходов от уровней.

В реальных условиях построить многолетние зависимости $Q = f(H)$ удаётся крайне редко. Поэтому предпочтительнее прогнозировать уровни воды напрямую, так как это уменьшает конечную погрешность прогнозных значений и облегчает использование данной методики. В качестве предикторов можно использовать уровни воды, которые измеряются непосредственно на посту, а также уровни воды вышерасположенных постов. Другой не менее актуальной проблемой прогнозирования является выбор оптимальных, наиболее строгих, критериев качества, которые удовлетворяют требованиям Гидрометцентра России.

Таким образом, цель настоящей работы – разработать методический подход к прогнозированию уровней воды различного генезиса и подходы к оценке качества и эффективности методик прогнозирования уровней воды, измеренных с различной временной дискретностью. Для достижения поставленной цели исследования необходимо на конкретном примере рассмотреть методический подход к прогнозированию срочных уровней воды с различной заблаговременностью, показать алгоритм определения оптимальной заблаговременности выпускаемых

прогнозов, апробировать различные математические подходы к прогнозированию и, наконец, выработать методический подход к оценке качества выпускаемых прогнозов.

В качестве объекта для апробации предлагаемых подходов выбран бассейн полугорной р. Мармарик. Для этого объекта имеются ряды наблюдений за срочными значениями уровней воды и расходов воды.

Бассейн реки Мармарик является стратегически важным объектом с точки зрения содержащихся в реке водных запасов для использования их в сельскохозяйственном и энергетическом секторах [9]. К тому же, долина р. Мармарик имеет большие рекреационные возможности, в её долине находится месторождение минеральной воды “Анкаван” [10, 11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе использованы двусрочные данные наблюдений за уровнем воды (ряд № 1) с 1 апреля по 30 июня (182 значения в год) по гидрологическим постам (таблица 1) за период с 2011 по 2022 год [8] в бассейне р. Мармарик. По срочным уровням воды также определены максимальные их значения за год (ряд № 2). Исходная информация (ряд № 1) представляет собой временной ряд, который может быть рассмотрен как нестационарный периодически скоррелированный случайный процесс [12, 13]. Под случайным процессом понимается такой процесс, каждое из сечений которого представляет собой случайную величину [12]. Случайный процесс представляется в виде сечений и реализаций. Под сечением случайного процесса понимается случайная величина, в которую обращается случайный процесс в момент времени t , под реализацией случайного процесса понимается неслучайная функция $x(t)$, в которую превращается случайный процесс $X(t)$ в результате опыта. В данном случае каждый срок наблюдения является сечением случайного процесса, а каждый год реализацией, таким образом каждое из 182 сечений содержит 11 значений по каждой реализации. Ряд № 2 является случайной величиной.

Критерием качества при этом может стать отношение величины стандартной ошибки прогнозирования к стандартной ошибке “природного” прогноза. Под “природным” понимается такой прогноз, когда на следующий шаг даётся значение характеристики на настоящий момент времени.

Таблица 1. Отметки уровней воды, превышение которых приводит к формированию неблагоприятных гидрологических явлений

Гидрологический пост	Р. Гомрагет – п. Меградзор	Р. Мармарик – п. Анкаван	Р. Мармарик – п. Агавнадзор
Отметка, см	234	123	368

Также в качестве критериев качества Гидрометцентр России рекомендует использовать отношения S/σ и S/σ_Δ [14] (где S – среднеквадратическая погрешность; σ – среднеквадратическое отклонение, рассчитанное по фактическому ряду; σ_Δ – среднеквадратическое отклонение прогнозируемой величины за период заблаговременности). Применимость данных критериев для прогнозирования случайных процессов в наставлениях не оговаривается.

За рубежом применяется также критерий Нэша–Сатклиффа. В классическом представлении коэффициент Нэша–Сатклиффа рассчитывается по формуле [15]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}; \quad (1)$$

где Q_m^t – прогнозное значение какой-либо характеристики, Q_0^t – фактическое значение какой-либо характеристики, $\bar{Q}_0$ – её среднее арифметическое значение.

Несмотря на недосказанность в руководящих документах, данный коэффициент в приведённом виде (также как и критерии, предложенные Гидрометцентром) может использоваться только при прогнозировании или моделировании *случайных величин*, несмотря на повсеместное их использование для любых целей, связанных с прогнозированием и моделированием. Невозможность их использования связана с тем, что стандартное (среднеквадратическое) отклонение случайного процесса, в отличие от случайной величины, является не фиксированным числом, а неслучайной функцией, которая рассчитывается отдельно по каждому из сечений случайного процесса (в данном случае за каждый срок наблюдений) [12]. В настоящей работе анализ полученных результатов произведён по различным классическим критериям [14], в том числе комбинированным. При прогнозировании случайных величин предлагается пользоваться отношениями S/σ и S/σ_Δ и критерием Нэша–Сатклиффа (1), при прогнозировании случайного процесса величины σ и σ_Δ должны

быть рассчитаны относительно математических ожиданий случайного процесса, которое также должно быть использовано в критерии Нэша–Сатклиффа. При этом значения соотношений S/σ и S/σ_Δ должны быть меньше 0.80, однако в ряде случаев удовлетворительными принимаются модели, для которых приведённые отношения меньше 1.0 [16].

На предварительном этапе исследования также было установлено, что построение многолетней зависимости $Q = f(H)$ не представляется возможным, поэтому уровни целесообразно прогнозировать напрямую в зависимости от уровней на целевом посту (р. Мармарик – п. Агавнадзор) и вышележащих створах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Уровненный режим рек данного бассейна достаточно сложен, так как обуславливается различными факторами формирования, включая такие как увеличение расходов воды вследствие половодья, паводков и таяния ледников, которые могут поддерживать относительно высокие уровни воды достаточно продолжительное время. За представленный период наблюдений, уровни воды несколько раз превышали неблагоприятные отметки (таблица 1).

Превышение данных отметок по целевому посту Агавандзор отмечалось трижды за рассматриваемый период, при этом наибольшее по длительности и величине превышение приведённых отметок наблюдалось в 2011 г., когда неблагоприятные уровни наблюдались с 30 апреля по 8 мая, а высший уровень воды составил 396 см, при этом стоит отметить, что на р. Гомрагет – п. Меградзор также наблюдалось превышение отметок, однако превышение неблагоприятных отметок по притоку началось позже, чем по основной реке. Малая повторяемость неблагоприятных гидрологических явлений, а также атипичность сроков их формирования (для гидрологического прогнозирования необходимо, чтоб прогнозируемые явления развивались сверху вниз по течению) приводит к невозможности установления уровней воды на вышележащих створах, при которых на целевом створе

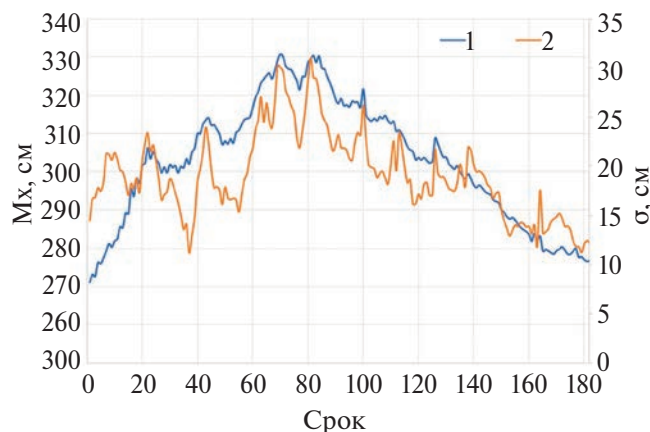


Рис. 1. Оценка математического ожидания (1) и стандартного отклонения (2) срочных уровней воды р. Мармарик — п. Агавнадзор за период наблюдений 2011–2022 гг.

происходит формирование неблагоприятных гидрологических явлений.

Для оценки эффективности прогностических методик необходимо рассчитать статистические параметры случайного процесса по 182 сечениям, которые соответствуют 91 дню и соответственно 182 срокам наблюдения и 11 реализациям, которые соответствуют анализируемым годам. Математическое ожидание и стандартное отклонение случайного процесса есть неслучайные функции, значения которых были рассчитаны отдельно по каждому из сечений (рис. 1).

Приведённый график показывает характерные значения уровня воды для каждого срока наблюдений с 1 апреля по 30 июня, также на данном графике показано стандартное отклонение, которое характеризует среднюю квадратическую ошибку при ориентировании на средние значения уровней воды. Можно отметить когерентный ход двух графиков, то есть при увеличении уровня воды, увеличивается и его разброс, при этом максимальные значения стандартного отклонения достигают всего 31 см, что свидетельствует об относительно малой изменчивости прогнозируемой величины и возможности ориентирования на среднее значение при долгосрочном прогнозировании. Рассчитанные стандартные ошибки определения математического ожидания достигают 9%, в среднем составляют 5% от величины среднего значения уровня воды за конкретные сроки измерения, таким образом, величина ошибки определения математического ожидания не превышает 10%, что свидетельствует о высокой надёжности и возможности использования данных значений при долгосрочном

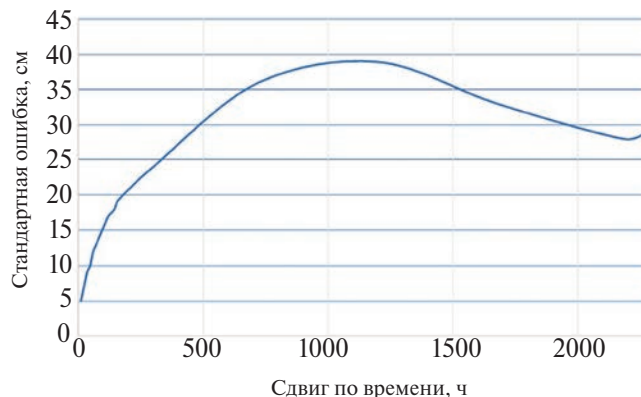


Рис. 2. Изменение стандартной ошибки «природного» прогноза в зависимости от увеличения заблаговременности.

прогнозировании уровня воды в реке Мармарик по п. Агавнадзор.

Говоря о краткосрочном прогнозировании, мы можем иметь в виду прогнозирование уровня воды на один или несколько шагов вперёд с фиксированной заблаговременностью прогноза (в данном случае решается задача прогнозирования случайного процесса, представляемого в виде временного ряда), либо прогнозирование высших или экстремальных уровней воды, которые представляют собой случайную величину. В первом случае одним из наиболее строгих критериев (при условии относительно малой изменчивости уровня воды) является так называемый «природный» прогноз. Стандартная ошибка подобного прогноза растёт с увеличением заблаговременности, достигая в пике 39 см, в виду наличия межгодовой связанности данных, после пика ошибка начинает убывать, достигая минимума при сдвиге, кратном сезонности (рис. 2).

Таким образом, при долгосрочном прогнозировании уровней воды можно ориентироваться не только на математическое ожидание случайного процесса, но и на уровни воды прошлого года за те же сроки наблюдения, при этом стандартная ошибка уменьшается на 2 сантиметра и составляет 28 сантиметров. При краткосрочном прогнозировании уровней воды на 12 часов вперёд стандартная ошибка природного прогноза составляет 5 см, на 24 часа вперёд — 7 см. Таким образом, при оценке качества выпускаемых прогнозов по разработанным моделям стандартная ошибка прогнозирования с заблаговременностью один год должна быть меньше 22 см, а при прогнозировании на 12 часов вперёд меньше 4 см.

ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ ВОДЫ

Основная задача, которая должна решаться при разработке любой прогностической модели это оценка её эффективности, то есть насколько тот или иной подход лучше статистических. При разработке долгосрочных методик прогнозирования в настоящее время, как правило, используется два подхода: метод Авторегрессии интегрированного скользящего среднего (АРПСС) и метод обучения искусственных нейронных сетей, сравнение данных методов было представлено в работе [17], анализ показал сопоставимую эффективность обоих подходов.

В данном случае, однако, подобные модели практически неприменимы из-за временного разрыва: для построения модели необходимы данные без разрывов периода, так как суть авторегрессии заключается в связывании предшествующих и будущих значений прогнозируемой величины. Таким образом, никакой из наборов параметров модели АРПСС не может описать данный ряд с достаточной точностью. В настоящей работе было инициализировано несколько прогностических моделей с примерно одинаковым качеством выпускаемых прогнозов, проверка моделей производилась по данным 2022 года, при этом все модели показали качество значительно более низкое по сравнению с ориентированием на математическое ожидание случайного процесса (рис. 3).

Анализируя данный график, можно прийти к однозначному выводу о наличии систематической ошибки, причиной которой является разрыв периода наблюдений (модель воспринимает ряд неразрывным). Исправить данную проблему можно, если выпускать прогноз на 3-й день после начала нового периода, когда появились правильные входные данные, после чего модель сможет дать намного более точный прогноз на 3 месяца вперёд. Однако, и в данном случае для 2022 года качество модели оказалось недостаточным по сравнению с ориентированием на математическое ожидание случайного процесса, так как при ориентировании на математическое ожидание 2022 году среднее квадратическое отклонение от него составило 10 см, а при использовании модели АРПСС средняя квадратическая ошибка прогноза составила 14 см, что свидетельствует о неэффективности модели, поэтому в целях долгосрочного прогнозирования рекомендуется ориентироваться на математическое ожидание случайного процесса при условии уточнения его значений по историческим

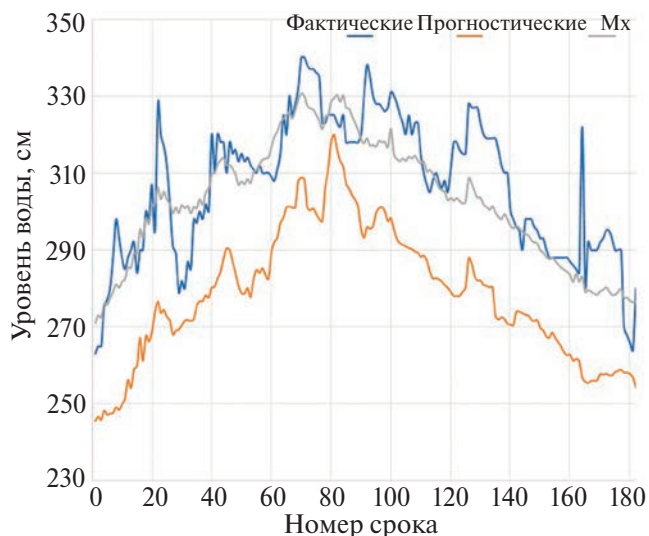


Рис. 3. Сравнение фактических и прогностических уровней воды с заблаговременностью один сезон при использовании модели АРПСС.

и будущим результатам наблюдений за уровнем воды. Таким образом можно сделать вывод, что разработка долгосрочных методик прогнозирования на реках, особенно с паводочным режимом, является нецелесообразным ввиду относительно малой автокорреляции данных и в подавляющем большинстве случаев следует ориентироваться на математическое ожидание случайного процесса, стандартной ошибкой прогнозирования при использовании такого подхода является стандартное отклонение случайного процесса.

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

При краткосрочном прогнозировании на один—два шага вперёд можно использовать метод обучения искусственных нейронных сетей. Большая инерционность процесса формирования уровней воды в любом случае предполагает использование данных за предшествующий период на целевом пункте, при этом в качестве дополнительных предикторов следует использовать данные вышележащих постов. В качестве таких предикторов в данном случае можно использовать данные по реке Мармарик — п. Анкаван и реке Гомрагет — п. Меградзор. При этом одной из промежуточных задач является определение оптимальной заблаговременности такого прогноза.

Для определения времени добегания между постами (а, следовательно, и заблаговременности) следует проанализировать парные

коэффициенты корреляции между предиктантом (целевым постом) и двумя предикторами, соответственно время добегания будет равно временному сдвигу, при котором коэффициент корреляции наибольший, также целесообразным является анализ дат формирования высших уровней воды на всех трёх постах. Результат анализа дат формирования и коэффициентов корреляции показал, что высшие уровни воды формируются практически в одни сроки наблюдений на постах Анкаван и Агавнадзор, однако высшие уровни воды на притоке формируются раньше, чем на основном посту на 24 часа, что позволяет использовать приведённые данные при разработке краткосрочной методики прогнозирования с приведённой заблаговременностью 24 часа. Для меньшей заблаговременности наиболее целесообразным является ориентирование на фактическое значение уровня воды в момент выпуска прогноза, так как в течение суток уровни воды практически не меняются. Таким образом, для прогнозирования срочных уровней воды реки Мармарик – п. Агавнадзор с заблаговременностью 24 часа следует использовать следующие предикторы: уровень воды целевого поста на 24 часа раньше срока выпуска прогноза, уровни воды по р. Гомрагет – п. Меградзор, также в связи с тем, что уровни воды обладают выраженной сезонностью в качестве предиктора следует добавить номер срока наблюдений. Стоит отметить, что эта зависимость будет носить сложный характер, что предопределяет необходимость использования возможностей обучения искусственных нейронных сетей.

В настоящей работе предлагается пользоваться возможностями программного комплекса *Statistica 12* [18], который позволяет в автоматизированном режиме выбирать лучшую архитектуру нейронной сети и настраивать внутренние параметры. Анализ показал, что наилучшие результаты дают нейронные сети многослойного персептрона (MLP), содержащие 13–15 скрытых нейронов. Лучшие результаты показала нейронная сеть MLP 3-13-1, использующая в качестве активационной функции гиперболический тангенс. Сравнение фактических и прогностических данных при использовании данной нейронной сети приведены на рис. 4.

Анализ приведённого графика свидетельствует о достаточно высокой степени соответствия фактических и прогностических данных, что говорит о возможности использования данной модели при краткосрочном прогнозировании. Коэффициент Нэша–Сатклиффа, рассчитанный

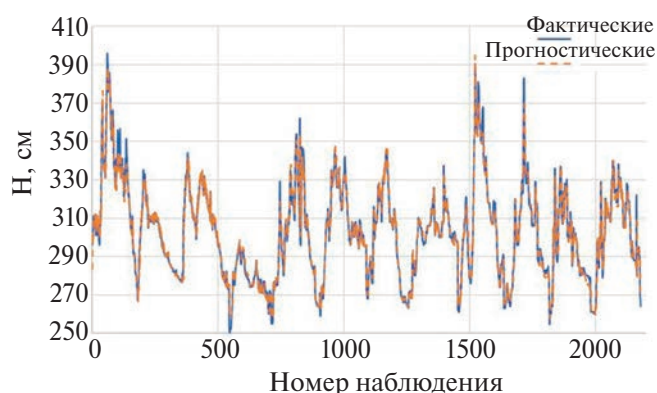


Рис. 4. Сравнение фактических и прогностических срочных уровней воды реки Мармарик – п. Агавнадзор за период наблюдений 2011–2022 гг.

по формуле (1), для данной модели составил 0.93, что должно свидетельствовать о крайне высоком качестве выпускаемых прогнозов. Однако, как уже было сказано выше, прогнозируемая величина является случайным процессом, следовательно, среднее арифметическое значение является не фиксированным числом, а функцией, представленной на рис. 2, таким образом, формулу для расчета коэффициента Нэша–Сатклиффа следует переписать:

$$NSE^* = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}; \quad (2)$$

где $\bar{Q}_0$ – оценка математического ожидания случайного процесса, рассчитанного по 182 сечениям.

Таким образом, NSE^* составил 0.88, что всё ещё свидетельствует о высоком качестве выпускаемых прогнозов. Аналогичную оценку даёт и анализ отношения S/σ .

Расчёт средних изменений за каждый срок наблюдений и вывод среднего изменения уровня воды за период заблаговременности как функции не является целесообразным ввиду её сложности и безусловной условности (при этом среднее изменение за период заблаговременности, за счёт периода роста и спада уровней воды, рассчитанное за многолетний период равно нулю). Поэтому в качестве наиболее строгого критерия качества предлагается выбрать ориентирование на значение уровня воды по целевому пункту в момент выпуска прогноза в предположении, что за период заблаговременности он не изменится, выше было рассчитано, что стандартная ошибка такого прогноза составляет всего 7 см.

Стандартная ошибка прогностической модели составила 6 см, а отношение двух ошибок 0.86, что несколько больше 0.80 и свидетельствует об относительно малой эффективности модели. Так как прогнозируемая величина является случайным процессом, то анализ её ошибок должен также производиться по каждому из сечений, однако наиболее показательна всегда эффективность методики при прогнозировании экстремальных величин, поэтому эффективность подобных методик рекомендуется также в обязательном порядке проверять на максимальных значениях прогнозируемой величины.

Для оценки качества прогнозирования высших уровней воды (рис. 5) за год необходимо выбрать высшие уровни воды за год, рассчитать среднее их значение и стандартное отклонение, а также среднее изменение за период заблаговременности. Можно отметить, что среднее значение высших за год уровней воды составляет 351 см, а стандартное отклонение от среднего 28 см, среднее изменение за период заблаговременности (24 часа) составило 15 см, стандартная ошибка модели при прогнозировании высших уровней воды — 20 см, (модель природного прогноза для высших уровней воды имеет стандартную ошибку, равную 25 см). Таким образом, можно рассчитать отношение S/σ и S/σ_{Δ} , которые равны 0.71 и 1.33. Модель эффективно прогнозирует высшие уровни воды по сравнению с ориентированием на их среднее значение и моделью природного прогноза, но неэффективна по сравнению с ориентированием на среднее изменение уровня за период заблаговременности. Однако надо учитывать, что прогноз по модели выпускается непрерывно, а для ориентирования на среднее изменение уровня за период заблаговременности необходимо определить дату выпуска прогноза, что ввиду отсутствия маркеров невозможно (заранее неизвестно, через какое время сформируется высший уровень воды), поэтому критерий S/σ_{Δ} является фиктивным и не может свидетельствовать об эффективности подобных методик при их использовании для прогнозирования экстремальных значений величин.

Можно заключить, что приведённая методика прогнозирования является достаточно эффективной при краткосрочном прогнозировании срочных уровней воды реки Марамарик по п. Агавнадзор, в том числе при прогнозировании высших уровней воды. Представленный в настоящей работе подход к прогнозированию является универсальным и апробированным на многих реках Российской Федерации [19, 20].



Рис. 5. Фактические и прогностические высшие уровни воды за год реки Марамарик по п. Агавнадзор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ, приведённый в данной работе, показал особенности и нюансы разработки моделей прогнозирования временных рядов, при этом немалое внимание уделено вопросу корректности применения тех или иных критериев эффективности методик прогнозирования.

Можно заключить, что при долгосрочном прогнозировании уровней воды на Марамарик по п. Агавнадзор целесообразнее всего ориентироваться на оценку математического ожидания случайного процесса, при этом рекомендуется уточнение его значений с учётом исторических и будущих значений уровней воды. Стандартная ошибка должна в среднем составлять 19 см. При краткосрочном прогнозировании уровней воды на один срок вперед (12 часов) целесообразнее всего ориентироваться на значение уровня воды, приходящиеся на дату выпуска прогноза, стандартная ошибка такого прогноза составляет 5 см. Для прогноза уровня воды на 24 часа вперёд целесообразна разработка нейросетевых моделей прогнозирования с учётом развития ситуации на р. Гомрагет — п. Меградзор. В данном случае дальнейшее улучшение качества выпускаемых прогнозов возможно при использовании данных за больший период наблюдений и целый год.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при поддержке КНРА (Комитет науки Республики Армения) и РЦНИ (Российский центр научной информации) в рамках совместной научной темы “Краткосрочный вероятностный прогноз стока рек в период весеннего половодья” № 20RF-039 и № 20-55-05006\20 соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маргарян В. Г., Гайдукова Е. В., Азизян Л. В., Мисакян А. Э. Особенности формирования весеннего половодья в бассейне реки Арпа // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 3. С. 126–152.
2. Маргарян В. Г., Гайдукова Е. В., Азизян Л. В., Хаустов В. А. О прогнозе максимальных расходов весеннего половодья реки Арпа // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 3. С. 75–87. https://doi.org/10.35567/19994508_2022_3_6
3. Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Прогнозы стока горных рек. Л.: ЛГМИ, 1987. 55 с.
4. Христофоров А. В., Юмина Н. М., Белякова П. А. Прогноз паводкового стока рек черноморского побережья кавказа с заблаговременностью одни сутки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 3. С. 50–57.
5. Борщ С. В., Симонов Ю. А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Тр. Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 63–87.
6. Болтабаев В. Г., Овчинников А. М. Краткосрочные прогнозы стока горных рек методом множественной регрессии // Тр. САНИГМИ. 1970. Вып. 52 (67). С. 90–98.
7. Мухин В. М. Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // Тр. Гидрометцентра России. 2013. Вып. 349. С. 5–46.
8. Гайдукова Е. В., Маргарян В. Г., Винокуров И. О. и др. Прогнозирование расходов воды р. Мармарик (Армения) по уравнению кинематической волны // Гидрометеорология и экология. 2023. № 71. С. 277–292. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-71-277-292>
9. National Adaptation Plan to Advance Medium and Long-Term Adaptation Planning in Armenia Project “Development of Water Sector Adaptation plan in Armenia” // UNDP/GCF, Ministry of the Environment of Armenia, 2021. URL: http://www.nature-ic.am/Content/announcements/12796/WSAP_draft_report_eng.pdf (date of application: 27.08.2023).
10. Маргарян В. Г. К оценке многолетних колебаний максимального стока реки Мармарик // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 57. С. 22–31. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-57-22-31>
11. Маргарян В. Г. Прогноз максимального стока реки Мармарик и оценка его реакции на глобальное изменение климата (Армения) // Геосферные исследования. 2019. № 4. С. 35–45. <https://doi.org/10.17223/25421379/13/4>
12. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2013. 408 с.
13. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. М.: Издательство Мир, 1974. 198 с.
14. Попов Е. Г. Основы гидрологических прогнозов, Л.: Гидрометиздат, 1968. 294 с.
15. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. 10(3). P. 282–290.
16. Морейдо В. М., Гарцман Б., Соломатин Д. П. и др. Возможности краткосрочного прогнозирования стока малой реки с использованием методов машинного обучения // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2020. Т. 2. № 4. С. 375–390.
17. Сумачев А. Э., Мякишева Н. В., Маргарян В. Г. и др. Долгосрочное прогнозирование уровней воды озера Ильмень с использованием вероятностных подходов // Естественные и технические науки. 2021. № 6(157). С. 96–102.
18. Электронный учебник по статистике. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (date of application: 05.05.2021)
19. Сумачев А. Э., Банищикова Л. С. Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода // Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 446–459. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-446-459>
20. Сумачев А. Э. Совершенствование методов прогнозирования характеристик ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей: специальность 16.16.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2022. 173 с.

EXPERIENCE IN APPLYING PROBABILISTIC APPROACHES IN PREDICTING THE LEVEL REGIME OF THE MARMARIK RIVER

A. E. Sumachev¹, E. V. Gaidukova², V. G. Margaryan³, A. M. Sedrakyan⁴

¹*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation, a-sumachev@mail.ru*

²*Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg, Russia, oderiut@mail.ru*

³*Yerevan State University (YSU), Yerevan, Armenia, vmargaryan@ysu.am*

⁴*National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia, asedrakyan@seua.am*

The possibility of short-term and long-term forecasting of water levels, including those associated with dangerous hydrological phenomena on the Marmarik River, using various probabilistic approaches, including regression dependencies, an integrated moving average autoregression model, and multilayer perceptron models, is considered. To evaluate the effectiveness of prognostic methods, the statistical parameters of a random process are calculated, while recommendations are given using the classical criteria for the effectiveness of issued forecasts. For long-term forecasting, the expediency of using the integrated moving average autoregression model was assessed, while it is noted that these models in the classical representation are not applicable due to time gaps, and therefore it is recommended to focus on the mathematical expectation of a random process. For short-term forecasting one or two steps ahead, the method of training artificial neural networks was used. The analysis carried out in the work revealed that in the case of short-term forecasting of water levels for one period in advance (12 hours), it is most expedient to focus on the value of the water level attributable to the date of issue of the forecast, the standard error of such a forecast is 5 cm. For a 24-hour water level forecast forward, it is expedient to develop neural network forecasting models, taking into account the development of the situation on Gomraget—Meghradzor. A further increase in the quality of the outputs is possible when using data for a longer observation period and a whole year. At the same time, as an alternative to neural network forecasting models, physical and mathematical (hydraulic) models of the formation of water levels can be used.

Keywords: forecasting, artificial neural networks, water level, short-term forecasts, long-term forecasts