

Сведения об авторах

Потапов Вадим Петрович, профессор Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий», тел. 7 (3842) 21-14-00, e-mail: vadimptpv@gmail.com

Попов Семен Евгеньевич, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий», тел. 8 905 969 21 07. e-mail: popov@ict.sbras.ru

УДК 566.166(571.56)

DOI: 10.36535/0869-4176-2021-01-13

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА
МАКСИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА УЧАСТКЕ
Р. ЛЕНА ВОЗЛЕ П. ТАБАГА**

В.В. Тимофеева,
кандидат техн. наук **Г.П. Стручкова,**
кандидат физ.-мат. наук **Т.А. Капитонова**

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Прогнозирование максимальных уровней воды во время весеннего половодья на участках р. Лена необходимо для своевременной разработки превентивных мероприятий и минимизации размеров ущерба. Для чего предлагается использовать модели прогнозирования с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС), которые обладают способностью обучаться, учитывать скрытые закономерности и приобретают исключительную важность при прогнозировании природно-техногенных экстремальных ситуаций. В статье приводится сравнение результатов прогнозирования с помощью сетей Элмана и многослойного перцептрона (MLP). Сравниваются результаты использования различных структур сетей. Показано, что при моделировании на более длительный период, метод Элмана имеет небольшое преимущество перед методом MLP.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, сети Элмана, заторообразование, весенние половодья, максимальные уровни воды, данные многолетних наблюдений, прогнозирование.

USE OF NEURAL NETWORKS TO ANALYZE THE LEVEL OF SPRING FLOOD IN THE AREA OF CONSTRUCTION OF THE BRIDGE OVER THE LENA RIVER

*V.V. Timofeeva, Ph.D. (Tech.) G.P. Struchkova,
Ph.D. (Phys.-Math.) T.A. Kapitonova*

Larionov's Institute of Physical-Technical Problems of the North, SB RAS

Forecasting the maximum water levels during the spring flood in the sections of the river. Lena is necessary for the timely development of preventive measures to minimize the amount of damage from floods. For this, it is proposed to use forecasting models based on the use of artificial neural networks, which have the ability to learn, have the ability to take into account hidden patterns and become extremely important in predicting natural and technogenic extreme situations. The article compares the results of forecasting using Elman networks and multilayer perceptron (MLP). The results of using different network structures are compared. It is shown that when simulating for a longer period, the Elman method has a slight advantage over the MLP method.

Keywords: artificial neural networks, Elman networks, river congestion, spring floods, maximum water levels, long-term observation data, forecasting.

Введение

В последнее время экономические потери от катастрофических паводков и наводнений в Российской Федерации возрастают и требуют принципиально иного отношения к данным задачам, которые, на наш взгляд, должны основываться на численных методах.

Большой вклад в разработку методов, основанных на вероятностной теории описания речного стока, как стохастического процесса внесли Н.А. Картвелишвили, В.А. Лобанов, Д.А. Бураков и другие. В работах [1-3] при построении моделей учитывались и использовались результаты исследований основных составляющих водного баланса водоемов и водосборов с использованием стохастических свойств многолетних изменений. Рассматривались, анализировались и классифицировались экстремальные гидрологические ситуации на территории России и других стран, учитывалась роль природных и антропогенных факторов в их формировании, проводилось моделирование ожидаемых негативных последствий.

В [4] приводится обзор программ по системам предупреждения наводнений, используемых в США, Европе и Китае. В то же время стоит отметить, что широко распространенные методы прогнозирования, разработанные для европейских стран и территорий европейской части Российской Федерации, не могут применяться для сибирских рек, текущих с юга на Север.

Для обеспечения устойчивой деятельности и безотказной работы инфраструктуры в условиях холодного климата необходимо тщательное исследование и моделирование протекания процессов с учетом возникновения аномальности. Модели, технологии и методики прогнозирования риска возникновения ЧС природного и техногенного характера для избегания существенных экономических потерь и сохранения экологии региона следует разрабатывать и применять, в условиях Севера, где последствия меняющегося климата могут привести к чрезвычайным ситуациям.

Места формирования заторов, их мощность и протяженность, сроки образования и существования, повторяемость и т.д. зависят от большого числа факторов. Из них можно выделить несколько основных: сужение или расширение и извилистость русла, образование новых островов, которые создают потенциальные возможности заторообразования; колебания температуры воздуха; большого льда от 150 до 200 см.; режим вскрытия реки и ее притоков; техногенная деятельность.

Все эти факторы между собой тесно связаны и при комбинации основных из них наблюдаются катастрофические наводнения, которые, как правило, формируются на определенных участках реки в одних и тех же местах. На реках Якутии процесс заторообразования зависит от следующих факторов: толщины ледяного покрова от 100 до 200 см, больших скоростей течения, в среднем $1,0 \div 1,5$ м/с, извилистостью русла, наличием островов и песчаных наносов, некоторые из которых образуются и имеют свойство перемещаться со временем. Заторы при этом формируются на определенных участках реки, иногда протяженностью до 100 и более километров, продолжительность их составляет примерно от 3 до 5, а в некоторых случаях и 10 суток [5-7].

Заторные уровни воды на р. Лена образуются в период весеннего половодья при резком понижении температуры воздуха и формируются под влиянием общих для всей Лены факторов:

- морфологической особенностью русла таких как наличия протоков, выноса из речных наносов, уменьшением ширины реки;
- величины уровня реки в период начала замерзания;
- толщины льда;
- температуры воздуха в период прохождения паводка.

Цель работы – прогнозирование максимальных уровней воды в районе подводного перехода двух ниток газопровода и строительства моста через р. Лена возле п. Табага, где интенсивность заторообразования и наводнений превышает 0,8 с использованием нейронной сети Элмана. Предложенный прогноз позволит решить проблему обеспечения безопасности моста, минимизировать возникновение чрезвычайных ситуаций, избежать существенных экономических потерь, иметь возможность проводить упреждающие мероприятия. Следует отметить, что нигде в мире нет подобного моста через реку, толщина льда которой достигает 1,5 – 2 м.

Материалы и методы исследования

В данной работе для прогнозирования паводков на р. Лена предлагается использовать многолетние статистические данные максимальных уровней воды на участке в период весеннего половодья.

Для повышения оперативности и точности результатов прогноза предлагается применить искусственные нейронные сети, хорошо себя зарекомендовавшие при наличии нечеткой исходной информации и способные учитывать скрытые зависимости. Одной из задач исследования является изучение возможностей искусственных нейронных сетей различных классов и архитектур (ИНС) и расширение области их использования.

Методы искусственных нейронных сетей для прогнозирования паводков предлагаются в работах [8-9], в [10] проводилось сравнение результатов прогнозирования нейронными сетями типа MLP «многослойный персептрон» и RBF «радиально-базисной функции», результаты расчетов показали, что оба метода имеют точность в пределах 0,5-0,4 %, что вполне приемлемо для поставленной нами задачи.

Подобные модели хорошо себя показали в задачах прогнозирования, так как способны обучаться. В процессе обучения нейронная сеть выявляет зависимости между входными и выходными данными и на основе имеющихся факторов и последовательности предыдущих прогнозирует результаты на будущее. Такие модели могут использоваться в задачах прогнозирования, в привычном смысле нейронные сети не программируются, а обучаются, это является одним из преимуществ этих сетей перед традиционными алгоритмами. После нахождения связи между нейронами сеть определяет связь между входными и выходными данными, а затем на основе предыдущих значений и факторов может предсказать будущие значения изучаемой последовательности.

Для решения задачи прогнозирования максимальных уровней воды на реке Лена для участка в районе с. Табага создаем модели нейронной сети в среде MATLAB с использованием программного пакета Neural Network Toolbox. Модель построена на входных данных за период с 1938 г. по 2013 г., прогноз сделан на следующие четыре года.

Одним из преимуществ методов прогнозирования с использованием нейронных сетей является то, что для прогнозирования временного ряда нет необходимости выделения тренда, случайных и циклических составляющих. Нейронная сеть в процессе обучения сама определяет все вышеуказанное и должна это учитывать при построении прогноза. Также не берутся во внимание какие-либо внешние факторы, оказывающие влияние на поведение временного ряда. Задача состоит в том, чтобы получить высококачественный прогноз для нейронной сети, используя минимум входных данных. Для решения конкретной задачи прогнозирования необходимо выполнить настройку сети для получения наилучших результатов. Под настройкой сети подразумевается определение главным образом количества нейронов в скрытых слоях. Количество нейронов на скрытых уровнях будем устанавливать экспериментально. Кроме того, сюда же можно добавить выбор алгоритма обучения нейронной сети.

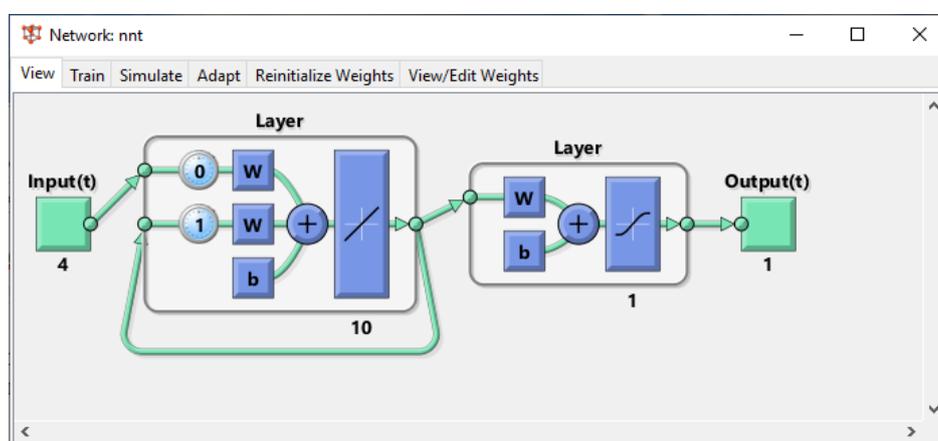


Рис. 1. Структура созданной нейронной сети Элмана

Для прогнозирования были созданы сети со следующими параметрами: архитектура – нейронная сеть Элмана с различным количеством входных данных и контекстных нейронов, обучение методом Левенберга-Марквардта, оценка функционирования сети – средне-квадратичная ошибка. Алгоритм Левенберга-Марквардта является одним из наилучших алгоритмов, который используется при обучении нейронной сети для решения задачи прогнозирования с использованием минимума входной информации. Нейронная сеть Элмана – один из видов рекуррентной сети, которая получается из многослойного персептрона введением обратных связей, что позволяет учесть предысторию наблюдаемых процессов и накопить информацию для выработки правильной стратегии прогнозирования. В отличие от обычного MLP сеть Элмана имеет дополнительные (контекстные) нейроны, которые получают сигналы из скрытого слоя сети, и распространяют в тот же скрытый слой с задержкой минимум на один тик. Сеть Элмана построена с функцией активации *purelin*, в качестве обучающего алгоритма выбран алгоритм «Levenberg-Marquardt» (*trainlm*). На рис. 1 представлена структура созданной в MATLAB нейронной сети.

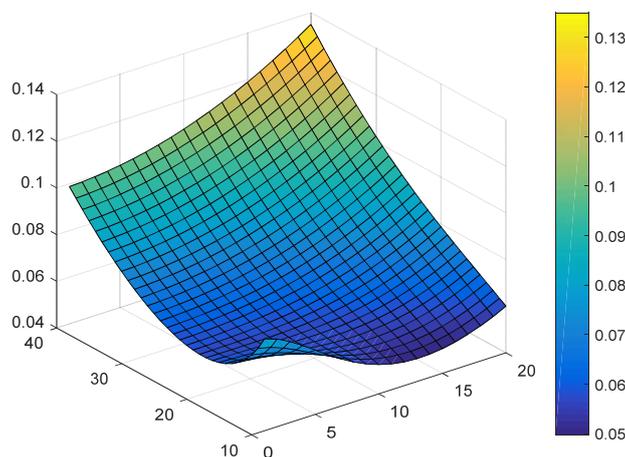
Проведем анализ полученных данных для выбора лучшей модели, сравнивая каждую модель по полученной ошибке. Из литературных источников известно, что качество прогнозирования зависит от размера окна, с чрезмерным ростом размера окна ухудшается качество прогностических способностей нейронных сетей (явление переобучения) и ошибка прогнозирования (обучения) зависит от количества нейронов скрытого слоя нейронной сети (равного в данном случае длине временного окна), т.е. $\delta = f(N, L)$.

Для формирования обучающего множества в задачах прогнозирования временных рядов используется метод скользящего окна. Этот метод подразумевает использование окна с фиксированным размером, способного перемещаться по временной последовательности входных данных, начиная с первого элемента, причем «окно» размером N , получив такие данные, передает на вход нейронной сети элементы с 1 по $N-1$, а N -ый элемент используется в качестве выхода. При создании обучающей выборки, меняя эти параметры необходимо найти баланс, при котором будет выше качество обучающей выборки. Как видно из графика ошибки обучения, рис. 2, имеется несколько «оптимальных» сочетаний (N, L) , при которых ошибка прогноза минимальна и изменяется от 0,13% до 0,3%. Используя эти результаты можно определять структуру нейронной сети при заданной точности прогноза, которая представлена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение ИНС Элмана с разными структурами по точности обучения

Длина окна	Кол-во нейронов скрытого слоя	Ошибка обучения
4	10	0,08
5	20	0,07
7	20	0,09
9	12	0,11
10	20	0,05
12	30	0,07
15	10	0,04
15	4	0,08
15	7	0,07
17	25	0,06
20	10	0,07
20	40	0,13

Рис. 2. Поверхность изменения ошибки прогнозирования при изменении сочетания (N, L)

Моделями с наименьшими ошибками обучения являются сети со следующей архитектурой: 10 входных параметров и 20 нейронов, 15 входных параметров и 10 нейронов, 17 входных параметров и 25 нейронов. Полученные результаты прогноза были сравнены с результатами, полученными в работе [10] с использованием ИНС MLP на том же ряде наборов данных.

В табл. 2 представлены результаты ретро-прогноза максимальных уровней воды, выполненные по предложенной модели и по нейронной сети MLP (персептрон) с различными архитектурами.

Таблица 2

Результаты ретро-прогноза максимальных уровней воды во время половодья на р. Лена в районе с. Табага в период 2011 – 2014 гг., выполненные с применением ИНС Элмана и ИНС MLP

	2011 Наб.935	Ош.	2012 Наб. 943	Ош.	2013 Наб. 899	Ош.	2014 Наб. 647	Ош.
сети	прогноз	%	прогноз	%	прогноз	%	прогноз	%
10-20	891	5	862	8	802	11	754	16
15-10	901	3	874	7	823	9	718	11
15-7	889	5	877	8	812	10	758	17

MLP	прогноз	%	прогноз	%	прогноз	%	прогноз	%
20-5-1	909	3	847	10	834	7	764	18
25-2-1	881	6	843	10	847	6	781	20
40-3-1	907	3	891	5	843	6	817	26

По результатам прогнозирования максимальных уровней воды в период половодья на участках реки Лена на 4 года, отраженных в табл. 2, можно сказать, что модель ИНС Элмана удовлетворительно описывает реальный уровень воды. Ошибки прогноза ИНС Элмана находятся в интервале (3-5)% и MLP (3-6)% в первый год, а в последующие годы в интервале ИНС Элмана (7-17)% и MLP (5-26)%. В целом, анализ результатов прогнозирования максимальных уровней воды показал достаточную адекватность выбранных статистических моделей.

Выводы

На основе гидрологических данных, полученных за 70 лет, получены нейросетевые модели, позволяющие прогнозировать опасности наводнения во время весенних половодий. Используемые методы ИНС, обладают способностью учитывать скрытые периодичности и строить алгоритмы обработки информации, обучаться и выявлять закономерности в потоке нечеткой противоречивой информации, и приобретают исключительную важность при прогнозировании уровней воды в экстремальных гидрологических ситуациях. Реализовано архитектурное решение ИНС Элмана. В ходе настройки сети варианты сравнивались по величине ошибки прогнозирования. Полученные наилучшие варианты сравнивались с результатами полученными ИНС MLP, сравнение показало, что модель, построенная на сети Элмана, удовлетворительно отражает реальный уровень воды, ошибки прогноза ИНС Элмана (3-5)% и MLP (3-6)% в первый год и в последующие годы ИНС Элмана (7-17)% и MLP (5-26)%. Т.е. при прогнозировании на 4 года, сеть Элмана показывает лучшие прогнозы на 2-4 годы.

Прогнозирование паводков играет значительную роль при строительстве и эксплуатации критически важных объектов, таких как мост через р. Лена и подводных переходов магистральных трубопроводов на территории Севера и Арктики.

Для надежного обеспечения прогноза уровня паводковой ситуации в районах с высокотехнологичной инфраструктурой и плотностью населения для снижения возможного ущерба и экономических потерь необходима система совершенствования принятия решений, которая должна опираться на современные ГИС, информационные технологии и

численные методы, основанные на статистических моделях. Для получения хорошего прогноза необходимо наличие или доступ к гидрометеорологическим данным статистической информации по уровню паводков и наводнений, толщины снежного покрова, колебаний температуры воздуха в течение всей паводковой ситуации. Для дальнейшего усовершенствования модели прогнозов также требуется наличие спутниковых данных и информация об ландшафтно-гидрологических особенностях реки.

Литература

1. Картвелишвили Н.А. Стохастическая гидрология / Н.А. Картвелишвили. Л., Гидрометеорологическое издательство, - 1980, 200 с.
2. Лобанов В.А., Никитин В.Н. Региональные модели определения характеристик максимального стока в зависимости от гидрографических факторов // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 11. – С. 60-69.
3. Бураков Д.А. Разработка технологии долгосрочного и краткосрочного прогнозирования сценариев развития паводковой обстановки и возникновения ЧС на опасных участках рек Енисей и Ангара в 2002 г. Выдача прогноза до начала и в ходе паводков // Отчет по объекту. Красноярск: Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СУГМС), Красноярский научно-исследовательский центр. - 2002. 27 с.
4. Романов А.В. Развитие системы прогнозирования наводнений в Российской Федерации. Часть 2. Специфика изменений // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2018. – № 1 (367). – С. 39-63.
5. Ноговицын Д.Д., Кильмянинов В.В. К вопросу прогнозирования заторных явлений на реке Лене // Наука и техника в Якутии. – 2007. - № 1. – С. 19-24.
6. Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Tarskaya L.E., Efimov V.M. Flood Prediction on the Lena River / G.P. Struchkova, // Journal of International Scientific Publication. Ecology & Safety. – 2011. – Vol. 5. – Part 3. – P. 16-24.
7. Кильмянинов В.В. Влияние метеорологических условий перед началом ледохода на масштаб заторных наводнений на р. Лена // Метеорология и гидрология. – 2012. - № 4. – С. 86-89.
8. Красногорская Н.Н., Ферапонтов Ю.И., Нафикова Э.В. Разработка методов прогнозирования гидрологических процессов для задач управления водными ресурсами // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2013. – № 28. – С. 43-50.
9. Красногорская Н.Н., Нафикова Э.В., Ферапонтов Ю.И. Оценка и прогнозирование экстремальных гидрологических ситуаций // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1. – С. 1-9.
10. Стручкова Г.П., Тимофеева В.В., Капитонова Т.А., Ноговицын Д.Д. Выбор структуры искусственных нейронных сетей для прогнозирования максимального уровня воды во время весеннего половодья на участке реки Лена // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2020. - № 1. – С. 99-106.

Сведения об авторах

Тимофеева Варвара Васильевна, научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН). 677980 г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, тел. +7 (4112) 39-05-05; +7 914 106 84 50 E-mail: varya.tim@mail.ru

Стручкова Галина Прокопьевна, ведущий научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН). 677980 г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, тел. +7 (4112) 39-05-05; +7 984 100 46 32 E-mail: g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru

Капитонова Тамара Афанасьевна, ученый секретарь Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН). 677980 г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, тел. +7 (4112) 39-06-05; +7 964 417 53 57 E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru