

Прогнозирование паводковых подтоплений на реках Сибири на примере прогноза уровня воды в реке Ия (Восточная Сибирь) на основе регрессионной многофакторной модели

С.И. Носков, Ю.Д. Аксенов, Ю. М. Сапожников

Иркутский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В работе на основе построенной авторами ранее многофакторной динамической регрессионной модели уровня воды в реке Ия (Восточная Сибирь) проведено прогнозирование этого показателя на июнь 2023 г. в трех вариантах: пессимистичный, оптимистичный и нейтральный (базовый). Сравнение результатов прогнозирования с фактическим значением уровня воды подтвердило высокую адекватность модели и хорошие перспективы ее будущего успешного применения для решения широкого круга прикладных и практических задач.

Ключевые слова: регрессионная модель, уровень воды в реке, лаг запаздывания, сезонная переменная, прогноз, адекватность, критерии.

Введение

Особенностью сибирских рек является то, что в большей своей части они формируются в отрогах горных массивов, где в ледниках и снежниках длительный период года консервируются осадки. Затем, в паводковый период, под действием положительных температур и теплых дождей, служащих триггером таяния снегов, реки получают огромное количество талой воды, что вызывает резкое повышение уровня воды и подтопление жилых массивов, расположенных в поймах этих рек.

Периодически в Сибири затапливаются более 1400 населенных пунктов. Большинство из них сосредоточено в южных, наиболее развитых территориях в бассейнах рек Обь, Томь и Енисей, меньше всего - в бассейнах северных рек. Паводочные, смешанные (от наложения дождей на снеготаяние) и заторные наводнения являются наиболее опасными [1].

Многочисленные негативные последствия сильных наводнений проявляются в виде прямого и косвенного ущерба населению и экономике затопленных районов. Основную часть прямого ущерба составляют непосредственные потери от наводнений: погибшие и раненые среди

населения, разрушенные и поврежденные жилые, административные, хозяйственные и другие объекты и сооружения, уничтоженный урожай сельскохозяйственных культур, снижение качества почв. К косвенному ущербу относятся, в частности, замедление темпов развития экономики пострадавших районов, ухудшение условий жизни населения, затраты на ликвидацию последствий стихийного бедствия. В России суммарная площадь земель, подвергающихся наводнениям, оценивается в 350-400 тыс. кв. км. Наводнениям с катастрофическими последствиями подвержена территория в 150 тыс. кв. км, на которой расположено более 300 городов, десятки тысяч поселков и сел (поселений). Среднемноголетний общий, прямой и косвенный ущерб от наводнений в настоящее время оценивается суммой свыше 40 млрд. руб. в год (Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2013 году»).

В качестве примера может служить паводок 2019 года в городе Тулун Иркутской области. В момент пика паводка максимальный уровень реки Ия поднимался до отметки 14 метров (при критической отметке 700 см). В результате были разрушены десятки домов, имелись жертвы среди населения. Именно этот случай послужил основанием для выбора р. Ия в качестве объекта для моделирования.

Имеется достаточно большой перечень статей, в которых моделируют или прогнозируют уровень различных водоёмов по всему миру в зависимости от различных факторов [2-4]. В этих статьях используются, в том числе, и всевозможные методы моделирования.

В настоящей работе будем также использовать и другой опыт прогнозирования по регрессионным моделям [5-7].

Наличие значимых факторов в генезисе паводковых проявлений дает основание с большой вероятностью предсказать их наступление и, тем самым, значительно уменьшить их негативный эффект. Ранее, в работе [8],

нами была предложена регрессионная модель уровня воды в реке Ия, разработанная на основе статистических данных по выделенным ежемесячным показателям за 2020-2023 гг. Эта модель имеет вид:

$$\begin{aligned} y = & -0.86x_t^1 - 6.96x_t^2 - 8.99x_{t-1}^6 - 2.43x_{t-2}^3 - 1.63x_{t-2}^6 + 7.75x_{t-3}^5 \\ & (-0.36) \quad (-2.96) \quad (-3.49) \quad (-1.05) \quad (-0.67) \quad (4.97) \\ & -8.57x_{t-4}^2 + 25.28x_{t-4}^3 + 6.08x_{t-5}^5 + 13.38x_{t-5}^6 - 2465.01 \\ & (-1.35) \quad (2.92) \quad (5.21) \quad (4.55) \end{aligned} \quad (1)$$
$$R^2 = 0.89, F = 19.66, E = 7.8\%$$

Где:

U_t – уровень воды в реке Ия в t -ом месяце, м.;

x^1 – количество дней с осадками в горах Саян, дн.;

x^2 – средняя дневная температура за месяц, °С;

x^3 – средняя ночная температура за месяц, °С;

x^4 – количество осадков в мм за месяц;

x^5 – глубина снежного покрова, см.;

x^6 – среднее атмосферное давление за месяц, мм рт. ст.;

R^2 – критерий множественной детерминации;

F – критерий Фишера;

E – средняя относительная ошибка аппроксимации.

Каждая независимая переменная имеет два индекса, где первый (верхний) – наименование природного параметра, а нижний индекс t указывает на задержку (лаг) в месяцах по отношению к данному месяцу.

Предложенная модель хорошо описывала сезонные колебания уровня воды в реке Ия, однако в переходные моменты – весна, осень модель «работала» несколько хуже. По этой причине, в модель был включен фактор сезонности [9-10]:

$$\begin{aligned} y = & 17.36x_t^2 - 24.61x_t^3 + 1.25x_t^4 + 9.83x_{t-1}^2 + 0.63x_{t-1}^4 - 11.26x_{t-2}^3 \\ & (3.04) \quad (-3.51) \quad (5.73) \quad (3.54) \quad (3.16) \quad (-3.84) \\ & + 5.09x_{t-3}^5 - 5.14x_{t-4}^6 + 7.35x_{t-5}^2 + 3.64x_{t-5}^5 + 39.02z_t + 5130.02 \quad (2) \\ & (4.84) \quad (-2.83) \quad (3.89) \quad (3.29) \quad (4.31) \\ & R^2 = 0.94, F = 33.59, E = 4.8\% \end{aligned}$$

Под каждым коэффициентом модели приведено значение t-критерия Стьюдента.

Сопоставление значений критериев адекватности моделей (1) и (2) указывает на существенно более высокое качество второй из них, что иллюстрируют представленные на рис.1 графики.

В данном исследовании мы экстраполировали значение уровня воды в реке Ия с целью предсказать возможное повышение уровня выше критического значения и связанного с ним подтопления населенных пунктов. Очевидно, что для нивелирования негативного эффекта неожиданности паводкового подтопления достаточно экстраполировать модель на 1-2 месяца вперед по отношению к настоящему моменту времени в уравнении (2).

Питание реки водой в основном имеет снеговой и дождевой характер. Весеннее половодье, связанное с таянием снегов, заканчивается в первой половине июня. Летние паводки вызываются длительными дождями. Определенную роль в питании реки играют и грунтовые воды, особенно в летний период.

Анализ уравнения (2) показывает, что наиболее значимыми факторами, влияющими на уровень воды в реке, являются ретроспективные факторы с лагом 1 – 5 месяцев. Значения этих факторов нетрудно получить, проводя мониторинг погодных условий в пойме реки.

Факторами, влияющими на уровень воды в реке за текущий месяц являются: x_2 – средняя дневная температура за расчетный месяц, °С; x_3 – средняя ночная температура за расчетный месяц, °С; x_4 – количество осадков

в мм. за расчетный месяц. Экстраполяция этих факторов осуществлялась усреднением их значений за соответствующий месяц по статистическим данным гидрометеорологических наблюдений за несколько предыдущих лет. При этом подстановка средних значений исходных параметров в регрессионное уравнение дает базовый сценарий повышения уровня воды в паводковый период. При использовании исторически максимальных значений факторов формируется пессимистичный прогноз и, соответственно, минимальные значения влияющих факторов приводят к оптимистичному прогнозу.

С целью проверки работоспособности предложенной схемы нами проведен расчет прогнозируемого значения уровня воды в реке Ия в июне месяце 2023 г. на основе имевшихся ретроспективных погодных факторов за период с января по май 2023 года (табл. 1-3).

Выполненные расчеты показали достаточно высокую адекватность результатов прогнозных значений уровня воды в реке Ия за июнь месяц по сравнению с реально имевшими место в 2023 году.

Таблица 1

Исходные данные для расчета прогнозируемого уровня реки Ия в июне 2023 года (оптимистичный сценарий).

	x^1 , дни	x^2 , °C	x^3 , °C	x^4 , мм	x^5 , см	x^6 , гПа	z	$У_t$, М
январь.23	7	-17	-20	17,5	17,46	1025,47	1	
февр.23	3	-10	-16	6,3	23,27	1026,5	1	
мар.23	2	-1	-6	7,5	19,22	1016,24	1	
апр.23	2	3	-3	18,6	1,2	1014,15	1	
май.23	4	12	5	37,50	0	1011,61	3	
июнь.23		19	11	27,8			5	354,59

Таблица 2

Исходные данные для расчета прогнозируемого уровня реки Ия в июне 2023 года (пессимистичный сценарий).

	x^1 , дни	x^2 , °C	x^3 , °C	x^4 , мм	x^5 , см	x^6 , гПа	z	$У_t$, м
янв.23	7	-17	-20	17,5	17,46	1025,47	1	
фев.23	3	-10	-16	6,3	23,27	1026,5	1	
мар.23	2	-1	-6	7,5	19,22	1016,24	1	
апр.23	2	3	-3	18,6	1,2	1014,15	1	
май.23	4	12	5	37,50	0	1011,61	3	
июн.23		21	11	113,7			5	496,69

Таблица 3

Исходные данные для расчета прогнозируемого уровня реки Ия в июне 2023 года (базовый, «нейтральный» сценарий).

	x^1 , дни	x^2 , °C	x^3 , °C	x^4 , мм	x^5 , см	x^6 , гПа	z	$У_t$, м
янв.23	7,00	-17,00	-20,00	17,50	17,46	1025,47	1	
фев.23	3,00	-10,00	-16,00	6,30	23,27	1026,50	1	
мар.23	2,00	-1,00	-6,00	7,50	19,22	1016,24	1	
апр.23	2,00	3,00	-3,00	18,60	1,20	1014,15	1	
май.23	4	12	5	37,50	0	1011,61	3	
июн.23		20	11,67	72,53			5	411,46

По истечении прогнозируемого месяца матрица значений ретроспективных факторов актуализируется с учетом метеорологических показаний за истекший месяц и осуществляется прогнозный расчет на следующий месяц – июль. Подобная схема поэтапного прогнозирования уровня воды в реке в паводковоопасный период позволяет, с одной стороны минимизировать ошибки прогнозирования, и, с другой стороны, обеспечить

достаточный срок для реакции на возникновение опасных последствий в случае реализации пессимистичного прогноза.

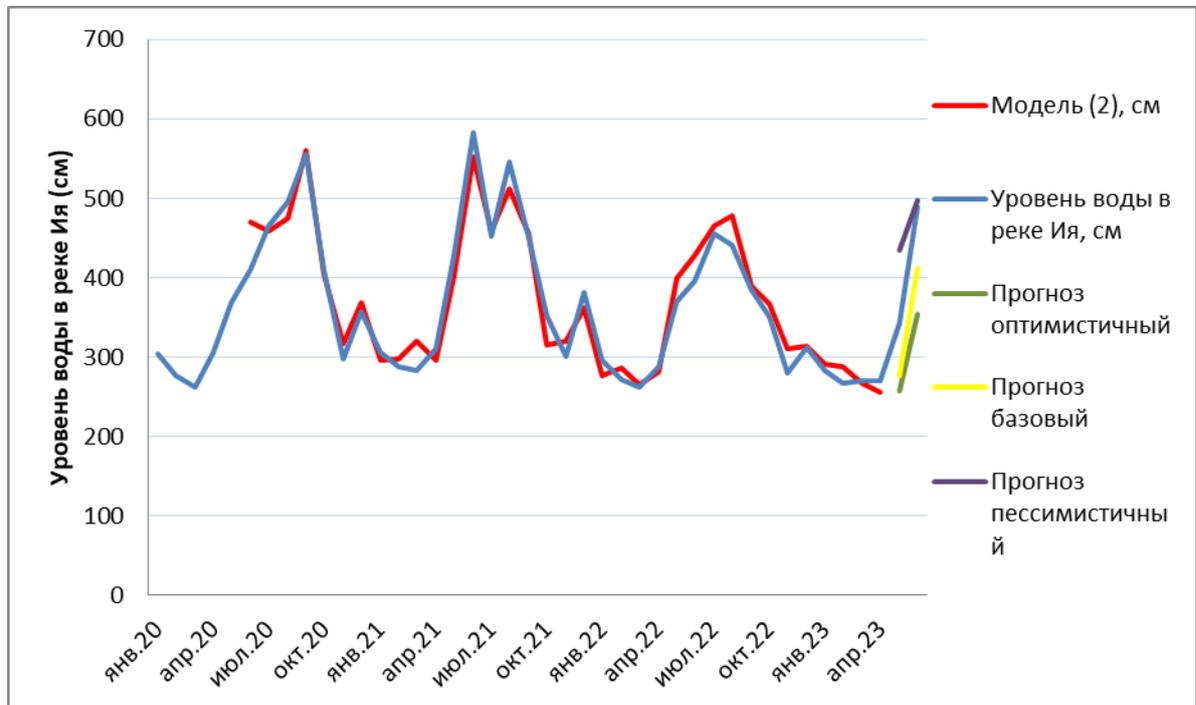


Рис.1. Графики расчетных значений моделирования уровня воды в реке Ия за 2020 – 2022 г. и прогноза на июнь месяц 2023 г.

Литература

1. Кичигина Н. В. Наводнения Сибири: географический и статистический анализ за период климатических изменений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 2021. №66,1, с. 41-60.
2. Логачёв А. ВВ, Логачёва О. М., и Карпик П. А. Математическая модель зависимости уровня воды в реке Оби от сброса воды на ГЭС // Вестник НГУЭУ, 2020, №. 2, сс. 177-182.
3. Yuan Zhi, Liu Jingxian, Liu Yi, Zhang Qian, Li Yue, Li Zongzhi A two-stage modelling method for multi-station daily water level prediction // Environmental Modelling & Software, 2022, Volume 156. URL: doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105468

4. Vizi, Z., Batki, B., Rátki, L. et al. Water level prediction using long short-term memory neural network model for a lowland river: a case study on the Tisza River, Central Europe // Environ Sci Eur 2023. №35, V92. URL: doi.org/10.1186/s12302-023-00796-3

5. Базилевский М.П., Врублевский И.П., Носков С.И., Яковчук И.С. Среднесрочное прогнозирование эксплуатационных показателей функционирования красноярской железной дороги // Фундаментальные исследования. 2016. № 10-3. С. 471-476.

6. Башарина О.Ю., Носков С.И. Методика анализа, оценки и прогнозирования динамики основных показателей функционирования складского логистического комплекса // Фундаментальные исследования. 2013. № 11-6. С. 1103-1107.

7. Головченко В.Б., Носков С.И. Прогнозирование на основе дискретной динамической модели с использованием экспертной информации // Автоматика и телемеханика. 1993. № 10. С. 140-148.

8. Носков С.И., Аксенов Ю.Д., Сапожников Ю.М. Регрессионное моделирование уровня воды реки Ия в Иркутской области // Инженерный вестник Дона, 2023, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8838

9. Носков С.И., Аксенов Ю.Д., Сапожников Ю.М. Уточнение регрессионной многофакторной модели уровня воды в реке Ия (Восточная Сибирь) // Инженерный вестник Дона, 2023, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8942

10. Носков С.И., Попов Е.С. Способ учета фактора сезонности при моделировании объектов на основе анализа статистической информации // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2023. № 4 (20). С. 32-36.



References

1. Kichigina N. V. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle, 2021 №66,1, pp. 41-60.
2. Logachëv A. VV, Logachëva O. M., i Karpik P. A. Vestnik NGUEU, 2020, №. 2, pp. 177-182.
3. Yuan Zhi, Liu Jingxian, Liu Yi, Zhang Qian, Li Yue, Li Zongzhi Environmental Modelling & Software, 2022, Volume 156. URL: doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105468
4. Vizi, Z., Batki, B., Rátki, L. et al. Environ Sci Eur 2023. №35, V92. URL: doi.org/10.1186/s12302-023-00796-3
5. Bazilevskiy M.P., Vrublevskiy I.P., Noskov S.I., Yakovchuk I.S. Fundamental'nyye issledovaniya. 2016. № 10-3. pp. 471-476.
6. Basharina O.YU., Noskov S.I. Fundamental'nyye issledovaniya. 2013. № 11-6. pp. 1103-1107.
7. Golovchenko V.B., Noskov S.I. Avtomatika i telemekhanika. 1993. № 10. pp. 140-148.
8. Noskov S.I., Aksenov YU.D., Sapozhnikov YU. M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2023/8838
9. Noskov S.I., Aksenov YU.D., Sapozhnikov YU. M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/
10. Noskov S.I., Popov E.S. Informatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye v upravlenii slozhnyimi sistemami. 2023. № 4. (20). pp. 32-36.

Дата поступления: 26.02.2024

Дата публикации: 9.04.2024