

УДК 502/504:627.131:627.152.12

С.Л. КУЛЕШОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

Д.В. КОЗЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Российская Федерация

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МОРФОМЕТРИИ РУСЛА НА ЧАСТОТУ ОБРАЗОВАНИЯ ВЕСЕННИХ ЗАТОРОВ ЛЬДА В ПРЕДЕЛАХ РЕЧНОГО БАССЕЙНА

Весенние наводнения, вызванные заторами льда на реках России, в 10% случаев имеют особенно тяжелые, и даже катастрофические последствия. Влияние особенностей строения русла на возникновение заторов известно давно, но обобщенной оценки влияния конкретных морфометрических факторов на частоту заторов льда до настоящего времени не было. Авторами разработана модель множественной регрессии с фиктивными бинарными переменными, позволяющая оценить влияние плановых изменений русла, деления речного потока и изменения его глубин на частоту заторов. Параметры модели определены по многолетним статистическим данным для двух речных бассейнов: реки Обь и водотоков, впадающих в Карское море между устьями рек Обь и Енисей, и рек побережья моря Лаптевых. Статистические оценки качества полученных моделей удовлетворительные. Впервые аналитически оценено влияние морфометрических факторов на частоту возникновения заторов в пределах речного бассейна. Доказано, что ранжирование факторов по степени их влияния на частоту образования заторов одинаково для обоих бассейнов. Наибольшее влияние на частоту возникновения заторов имеет разделение речного потока, затем следуют изменение русла в плане и изменение глубин речного потока. Выполнено сравнение степени влияния факторов между собой. Для обоих речных бассейнов выявлены практически одинаковые отношения коэффициентов регрессионных моделей.

Инженерная гидрология, затор льда, речной бассейн, морфометрические особенности русла.

Введение. Стихийное затопление прибрежных территорий водой, обусловленное возникновением затора или подпорными явлениями от скопления льда в ниже-расположенном створе речного русла, называют наводнением, вызванным ледовыми затруднениями. Размер ущерба, который возникшее наводнение может причинить экономике региона, зависит от степени освоения территорий речных бассейнов, высоты и скорости подъема уровней воды в реке, времени затопления.

Наводнениям, потенциально опасным для населения и экономики России, в настоящее время подвержено около 2,4-3,0% ее территории. Половина наводнений, приносящих социальный и эколого-экономический ущерб, относится к весенним паводкам. Согласно данным В.И. Осипова, наводнения, вызванные весенними заторами льда, в 10% имеют особенно тяжелые последствия [1]. По официальной статистике за 1991-2015 годы на территории Российской Федерации зарегистрировано 132 заторных

наводнения с зафиксированным материальным ущербом. Больше половины таких наводнений приходилось на два крупнейших речных бассейна: реки Обь и водотоков, впадающих в Карское море между устьями рек Обь и Енисей, и рек побережья моря Лаптевых. Анализ и оценка факторов, влияющих на частоту возникновения заторов, по-прежнему остается актуальным направлением инженерно-гидрологических исследований.

Влияние морфометрических параметров речного русла на образование ледяных заторов было отмечено еще в ранних исследованиях ледового режима рек и водоемов России. Образование заторов на р. Енисей на отмелях и вблизи островов описано Г. Третьяковым еще в 1869 году, а в местах сужений, подводных препятствий и крутых поворотов Е.В. Близняком в 1916 году [2]. В работах Ф.И. Бындина (1933 г.) к числу факторов, влияющих на заторообразование, отнесены расположение реки в плане, строение и форма ее русла и берегов [3]. Л.Г. Шуляковский отмечает, что естественные ме-

ста уменьшения продольного уклона русла имеют морфологические особенности, способствующие заторообразованию [4]. В работах И.Я. Лисера (1967 г.) и В.Я. Марусенко (1981 г.) отмечено, что образованию заторов подвержены створы речного русла, имеющие крутые повороты, сужения, острова, мелкие перекаты, пороги, места изменения уклонов [5, 6].

Морфометрические факторы В.А. Бузин относит к постоянным факторам заторообразования, гидрометеорологические – к переменным факторам [7]. Первая группа факторов определяет вероятность образования затора на конкретном участке реки, вторая группа – мощность затора. В исследованиях заторообразования на реке Томь, выполненных С.А. Агафоновой и Н.Л. Фроловой, формирование заторов льда объясняется сложным сочетанием географических, гидрологических, метеорологических и геоморфологических факторов [8].

Несмотря на известный факт влияния морфометрических особенностей речного русла на процесс заторообразования, комплексного анализа влияния различных элементов строения речного русла на частоту возникновения заторов льда до сих пор выполнено не было. Целью исследований стала оценка влияния характерных элементов строения речного русла на частоту образования заторов льда в пределах конкретного речного бассейна.

Материал исследований. Для выполнения расчетов использованы данные, включающие частоту образования заторов и описание особенностей речных участков, приведенные в Каталоге заторных и зажорных участков рек СССР [9]. Рассматривалось два речных бассейна: рек побережья моря Лаптевых (260 участков с числом наблюдений от 10 до 53 лет); бассейн Оби и водотоков, впадающих в Карское море между устьями рек Обь и Енисей (101 участок с числом наблюдений от 10 до 80 лет).

Методы исследований. На первом этапе из массива исходных данных были исключены участки, в которых действовали факторы, способные оказать влияние на частоту образования заторов льда помимо морфометрии русла. К ним относились участки с осенними зажорами, устьевые участки и участки с влиянием подпора со стороны нижележащих створов, участки с гидротехническими и транспортными сооружениями, а также участки, в пределах которых

применялись меры, препятствующие заторообразованию. Коэффициент извилистости включенных в выборку участков превышал 1,02 [10], прямолинейные участки исключались из рассмотрения. В анализ были включены только участки, морфометрические показатели которых в большей степени влияют на частоту возникновения заторов (но не на их мощность). Для построения математических моделей итоговая статистическая база данных включала 68 участков по первому речному бассейну и 45 участков по второму.

Методом исследований стал аппарат множественного регрессионного анализа с фиктивными переменными, соответствующими определенным видам морфометрии русла. Бинарные переменные принимали значение 1 при наличии на участке реки хотя бы одного из морфометрических показателей данного типа и принимали значение 0 при его отсутствии. Общий вид используемого уравнения множественной регрессии:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3, \quad (1)$$

где y – частота возникновения заторов в пределах участка; морфометрические особенности (характеристики): x_1 – крутой поворот, излучина, меандра; x_2 – разветвления, рукава, острова; x_3 – плесы, перекаты (пороги), отмели; a_1, a_2, a_3 – коэффициенты регрессии, значения которых необходимо определить на основании статистических данных по затороопасным участкам выбранного речного бассейна.

Модель имеет ряд особенностей спецификации. Бинарные переменные первого типа описывают плановое изменение русла. Бинарные переменные второго типа описывают деление речного потока. Бинарные переменные третьего типа описывают изменение глубин речного потока. Уравнение (1) не содержит свободного члена, так как функция отклика принимала нулевое значение при отсутствии указанных морфометрических факторов для всего статистического материала, используемого при построении модели. Модель неприменима для прогноза частоты образования заторов в зависимости от наличия тех или иных морфометрических особенностей русла (при значениях всех факторов x , равных 1, значение $y \neq 1$), а только позволит оценить степень их влияния на исследуемый показатель.

Результаты и обсуждение. После проведения расчетов методом наименьших

квадратов были получены следующие регрессионные уравнения:

- для бассейна рек побережья моря Лаптевых

$$y = 0,326x_1 + 0,420x_2 + 0,299x_3, \quad (2)$$

- для бассейна Оби и водотоков, впадающих в Карское море между устьями рек Обь и Енисей

$$y = 0,233x_1 + 0,263x_2 + 0,197x_3 \quad (3)$$

Качество регрессионных моделей было проверено по следующим критериям: значениям коэффициентов множественной корреляции R и детерминации R^2 ; значимости уравнения регрессии по F -критерию Фишера; значимости коэффициентов регрессии

с использованием t -статистики Стьюдента. Статистические оценки качества полученных моделей приведены в таблице 1.

Коэффициент детерминации R^2 (0,75 и 0,70) показывает высокий процент вариаций частоты заторов, объясняемый влиянием морфометрических особенностей речного участка. Теснота связи результирующего показателя и включенных в модель факторов достаточно высокая (коэффициенты множественной корреляции $R = 0,86$ и $0,84$). Обе модели значимы по критерию Фишера, а уравнения регрессии адекватны. Все коэффициенты регрессионных уравнений статистически значимы по критерию Стьюдента. Следовательно, полученные уравнения пригодны для дальнейшего инженерно-гидрологического анализа.

Таблица 1

Статистические оценки качества моделей множественной регрессии

Бассейн рек	R^2	Множественный R	Значимость F	P – значение для коэффициентов
Побережье моря Лаптевых	0,745	0,863	0,000	0,000; 0,000; 0,000
Обь и водотоков, впадающих в Карское море между устьями рек Обь и Енисей	0,701	0,837	0,000	0,001; 0,000; 0,001

Коэффициенты при бинарных переменных различны в уравнениях (2) и (3). Это связано с особенностями геоморфологического и гидрогеологического строения речных русел, характеристиками водосборов, различиями климатических условий и особенностей прохождения фаз и периодов ледового режима в каждом из речных бассейнов.

Общие закономерности влияния морфометрических параметров на частоту образования заторов льда дают не значения самих коэффициентов регрессии, а их ранжирование и сопоставление. Для обоих

укрупненных речных бассейнов влияние морфометрических показателей на частоту заторов, ранжированное в порядке убывания, одинаково: разделение речного потока (разветвления, рукава, острова); плановые изменения русла (крутой поворот, излучина, меандра); изменение глубин речного потока (плесы, перекаты, пороги, отмели).

Сопоставление отношений коэффициентов полученных регрессионных уравнений между собой позволяет сравнить влияние факторов по отношению друг к другу (табл. 2).

Таблица 2

Соотношения коэффициентов регрессионных уравнений в моделях частоты заторов

Характерные отношения	Бассейн рек побережья моря Лаптевых	Бассейн реки Обь и водотоков, впадающих в Карское море между устьями рек Обь и Енисей
x_2/x_1 отношение влияния разделения речного потока к изменению русла в плане	1,3	1,2
x_2/x_3 отношение влияния разделения речного потока к изменению глубин	1,4	1,3
x_1/x_3 отношение изменений русла в плане к изменению глубин	1,1	1,1

Для обоих крупненных речных бассейнов отношения коэффициентов при переменных, соответствующих морфометри-

ческим факторам, практически одинаковы. При прочих равных условиях деление речного потока в плане в 1,2...1,3 раза

сильнее влияет на частоту образования заторов льда, чем изменение русла в плане, и в 1,3...1,4 раза сильнее, чем изменение глубин потока. Изменения русла в плане в 1,1 раза сильнее влияют на частоту заторообразования, чем изменение глубин.

Выводы

1. Впервые аналитически оценено влияние морфометрических факторов на частоту возникновения заторов в пределах речного бассейна.

2. Одним из методов изучения влияния конкретных морфометрических особенностей речного русла на процессы заторообразования льда может быть построение моделей множественной регрессии с фиктивными бинарными переменными.

3. Ранжирование морфометрических факторов по степени их влияния на частоту образования заторов льда одинаково для бассейна рек побережья моря Лаптевых и бассейна Оби и водотоков, впадающих в Карское море между устьями рек Обь и Енисей.

4. Наибольшее влияние на частоту возникновения заторов льда для рассматриваемых укрупненных речных бассейнов имеет разделение речного потока, затем следуют изменения русла в плане и глубин речного потока.

5. При прочих равных условиях деление речного потока в плане в 1,2...1,3 раза сильнее влияет на частоту образования заторов льда, чем изменение русла в плане и в 1,3...1,4 раза сильнее, чем изменение глубин потока.

6. Изменения речного русла в плане в 1,1 раза сильнее влияют на частоту заторообразования, чем изменение глубин.

Библиографический список

1. **Осипов В.И., Рагозин А.Л.** Идентификация и прогнозная оценка стратегических природных рисков России // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2010. Т. 3, № 2. С. 163-178.

2. **Близняк Е.В.** Река Енисей от Красноярска до Енисейска, ч. II: Зимнее состояние реки. СПб, 1916. 79 с.

3. **Быдин Ф.И.** Вскрытие и замерзание рек / Тр. ГГИ. 1933. Вып. 9. С. 42-48.

4. **Шуляковский Л.Г.** О заторах льда и заторных уровнях воды при вскрытии

рек // Метеорология и гидрология. 1951. № 7. С. 45-49.

5. **Лисер К.Я.** Весенние заторы льда на реках Сибири. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 105 с.

6. **Марусенко И.Я.** Влияние ледовых образований на гидравлическое сопротивление потоков рек и каналов. Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1981. 159 с.

7. **Бузин В.А.** Зажоры и заторы льда на реках России. С. – Пб.: Изд-во ГГИ, 2016. 242 с.

8. **Агафонова С.А., Беркович К.М., Фролова Н.Н.** и др. Река Томь: морфология русла и заторы льда (в пределах Томской области) / Двадцать седьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов: сб. докладов и кратких сообщений. Ижевск.: 2012. 213 с. С. 4-12.

9. Каталог заторных и зажорных участков рек СССР: в 2 т. Т. 2. Азиатская часть СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 288 с.

10. Руководство по определению гидрографических характеристик картометрическим способом: [Утв. Госкомгидрометом 06.01.84]. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 91 с.

11. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России. Монография. Под общей редакцией Д.В. Козлова. М.: Издательство РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. 348 с.

Материал поступил в редакцию 14.09.2017 г.

Сведения об авторах

Кулешов Сергей Леонидович, аспирант кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева: 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д.19; e-mail: 5323737@mail.ru; тел. +7 (499) 976-21-56

Козлов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Ярославское шоссе, 26; тел. +7 (495) 287-49-14, e-mail: kozlovdv@mail.ru

S.L. KULESHOV

Russian State Agricultural University named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia

D.V. KOZLOV

Department of Hydraulics and hydraulic construction, FGBOU VO "National research Moscow state University of civil engineering", Moscow, Russia

ANALYSIS OF THE EFFECT OF CHANNEL MORPHOMETRY ON THE INCIDENCE OF SPRING ICE BLOCKS WITHIN THE RIVER BASIN

Spring floods caused by ice jams on the rivers of Russia, in 10% of cases have particularly severe consequences. The influence of structural features of the riverbed to the occurrence of congestion has long been known, but the generalized assessment of the influence of particular morphometric factors on the frequency congestion to the present time was not. The authors have developed the model of multiple regression with binary dummy variables to assess the impact of planned changes of the channel, dividing the river flow and changes of depths of frequency congestion. The model parameters are determined from long-term statistics for the two river basins: the basin of the Ob river and watercourses flowing into the Kara sea between the mouths of the rivers Obi and Yenisei, and the basin of the coast of the Laptev sea. Statistical evaluation of the quality of the obtained models are satisfactory. For the first time analytically evaluated the influence of morphometric factors on the incidence of congestion within the river basin. It is proved that the ranking of factors according to their impact on the incidence of congestion is the same for both basins. The greatest influence on the incidence of congestion is the division of the river flow, followed by changes in the channel in the plan and changing the depths of the river flow. The comparison of the degree of influence of the factors among themselves. For both river basins revealed almost identical relationships of the coefficients of the regression models.

Engineering hydrology, congestion, a river basin morphometric characteristics of the channel

References

1. **Osipov V.I., Ragozin A.L.** Identification and estimation of strategic natural risks in Russia // civil protection Strategy: issues and research. 2010. Vol. 3, № 2. P. 163-178.

2. **Blizniak, E.V.** Yenisei River from Krasnoyarsk to Yeniseisk, part II: Winter condition of the river. SPb., 1916. 79 s.

3. **Badin F.I.** Opening and freezing of rivers, Proc. GGI. 1933. Vol. 9. P. 42-48.

4. **Shulyakovskiy L.G.** On the jams of ice and ice-dam water levels at the opening of the rivers // Russian Meteorology and hydrology. 1951. № 7. P. 45-49.

5. **Liser K.J.** Spring ice jams on the rivers of Siberia. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967. 105s.

6. **Marusenko I.J.** the Effect of ice formations on hydraulic resistance of river flows and channels. Lviv.: Publishing house of Lviv University, 1981. 159 S.

7. **Buzin V.A.** ice dams and ice jams on the rivers of Russia. S. – Pb.: Izd-vo GGI, 2016. 242 s.

8. **Agafonov S.A., Berkovich K.M., Frolova N.N.** etc. the Tom River: morphology of riverbed and ice blocks (in the limits of Tomsk region) // The Twenty-seventh plenary interuniversity coordination meeting on erosion, channel and river mouth processes: collection of reports and summaries. Izhevsk, 2012. 213 S. P. 4-12.

9. Directory mash and nagornyh parts of the rivers of the USSR: in 2 t. T. 2. The Asian part of the USSR. L.: Gidrometeoizdat, 1978. 288 s.

10. Guidance on the determination of hydrographic characteristics cortometrajes way: [Ratified. Roskomgidrometa 06.01.84]. L.: Gidrometeoizdat, 1986. 91 s.

11. Dangerous ice phenomena on rivers and reservoirs of Russia. Monograph. Under the General editorship of D.V. Kozlov. M: Publishing house of Russian state agrarian University-MTAA named after K.A. Timiryazev, 2015. 348 p.

The material was received at the editorial office 14.09.2017

Information about the authors

Kuleshov Sersey Leonidovich, postgraduate student of the Department of complex use of water resources and hydraulics, Russian state agrarian University – MTAA named after K.A. Timiryazev: 127550, Moscow, Pryanishnikova st., 19; E-mail: 5323737@mail.ru; Phone +7 (499) 976-21-56

Kozlov Dmitry Vyacheslavovich, doctor of technical Sciences, Professor, head of Department of Hydraulics and hydraulic construction, FGBOU VO "National research Moscow state University of civil engineering", Moscow, Yaroslavl highway, 26, Phone +7 (495) 287-49-14, e-mail: kozlovdv@mail.ru.