

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 627.131: 627.152.12

### МНОГОМЕРНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ ФАКТОРОВ ЗАТОРООБРАЗОВАНИЯ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ<sup>1</sup>

© 2019 г. Д. В. Козлов<sup>1,\*</sup>, С. Л. Кулешов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
Россия 129337 Москва

<sup>2</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,  
Россия 127550 Москва  
\*e-mail: kozlovdv@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2018 г.

Принята к публикации 26.04.2018 г.

Показано, что анализ и количественная оценка факторов, влияющих на частоту возникновения ледовых заторов и параметры заторных наводнений по-прежнему остается актуальным направлением гидрофизических исследований. На основе применения методов дискриминантного анализа к данным многолетних наблюдений за водным режимом рек бассейна Северной Двины выполнена оценка влияния подпора от нижележащих створов на параметры заторных наводнений на затороопасных участках рек с построением классификационных функций для характерных участков. Кроме того, анализ моделей множественной регрессии позволил оценить влияние морфометрических особенностей речного русла на частоту образования заторов льда в пределах двух укрупненных речных бассейнов европейской и азиатской частей России.

*Ключевые слова:* речной бассейн, ледовый затор, факторы заторообразования, заторное наводнение, дискриминантный анализ, модели множественной регрессии.

DOI: 10.31857/S0321-0596462132-141

#### ВВЕДЕНИЕ

Катастрофические наводнения и другие стихийные бедствия, вызванные аномальными гидрометеорологическими явлениями, являются очевидными источниками угроз водной национальной безопасности. В настоящее время наводнениям, потенциально опасным для населения и экономики России, подвержено до 3.0% ее территории. Половина наводнений, приводящих к крупным социально-экономическим и экологическим ущербам, развивается при прохождении весенних паводков.

Территория Российской Федерации характеризуется многообразием опасных гидрологических явлений (высокий уровень воды в реках, паводки, низкая межень, наледи, нагонные явления и пр.), основными из которых для отдельных регионов являются наводнения, вызванные образованием заторов льда в речном русле. Выход воды и ледяных навалов на пойму, характерный для заторного наводнения, может повлечь за собой не

только материальный ущерб, но и человеческие жертвы, в 10% случаев такие наводнения имеют особенно тяжелые последствия [14].

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности речных бассейнов и природно-климатических условий позволяют выделить европейскую (ЕЧР) и азиатскую (АЧР) части России. Обширные просторы азиатской территории страны делятся на Сибирскую и Северо-Восточную со стоком рек в моря Северного Ледовитого океана, а также Дальневосточную со стоком рек в Тихий океан. Заторные наводнения характерны для рек севера ЕЧР, Сибирской и Северо-Восточной частей АЧР. Так, например, большая повторяемость заторов льда (70–100%), высокие заторные уровни (10–25 м) и заторные подъемы (4–6 м) наблюдаются на крупных сибирских реках вследствие больших расходов весеннего половодья. А в низовьях больших рек ЕЧР максимальные ледоходные уровни в 70% случаев являются максимальными годовыми уровнями, в арктической части Западной Сибири в 90%

<sup>1</sup> Описанные в статье результаты исследований получены при поддержке РФФИ (проект 17-77-30006).

случаев максимальные уровни рек наблюдались в первую неделю после ледохода [2].

Согласно официальной статистике, за 1991–2015 гг. в Российской Федерации зарегистрировано 132 заторных наводнения с зафиксированным материальным ущербом, из которых 87% приходилось на бассейны рек АЧР (рис. 1) [18]. Анализ динамики частоты заторных наводнений за этот период показал отсутствие статистически значимого тренда роста числа наводнений, повлекших материальные потери, как на ЕЧР, так и на АЧР. Лаговый анализ позволил сделать вывод об отсутствии циклических колебаний этого показателя.

Заторы льда – это многослойные скопления ледового материала в русле реки, возникающие при подвижках льда и в период ледохода, стесняющие живое сечение потока, вызывая тем самым подъемы уровней воды выше створа образования затора и затопление прилегающих территорий. Заторы льда, как правило, наблюдаются в весенний период при вскрытии реки и состоят из крупно- и мелкобитых льдин. Это стихийное явление типично для рек, текущих в северном направлении.

К ледовым затруднениям относятся не только заторы, возникающие при вскрытии рек, но и зажоры, образующиеся на шугоносных реках в период замерзания. Для этих явлений характерно скопление шуги и мелкобитого льда в речном русле, также вызывающее рост уровней воды.

Образованию мощного затора, согласно исследованиям В.А. Бузина [6], способствует определенное сочетание условий замерзания и вскрытия реки. В период замерзания – это

высокие уровни воды, повторяющийся ледоход и зажорные явления. В период вскрытия реки к таким условиям относятся:

- зашугованность русла на 50–80% от площади живого сечения;
- высокая скорость (0.6–0.8 м/с) течения воды у поверхности;
- к началу вскрытия толщина льда >0.7 м при ее отношении к толщине в месте заторообразования <0.5;
- незначительное (на 10–30%) снижение прочности льда;
- модуль стока –30–70 л/с км<sup>2</sup> при снеготаянии –5–7 мм/сут в верхней части речного бассейна;
- интенсивное поступление льда с верхних участков реки и притоков.

Перечисленные выше факторы заторообразования относятся к гидрометеорологическим, или переменным, факторам, изменяющимся от года к году и определяющим вероятность возникновения затора.

Постоянными факторами заторообразования считаются морфологические, к которым, в первую очередь, относят наличие русловых препятствий в виде островов, рукавов, поворотов, излучин, сужений, плесов и перекатов и т.п. Они способствуют усилению процесса заторообразования [5].

На ключевую роль геоморфологических факторов как потенциальных причин образования ледовых заторов указывается и в работах зару-

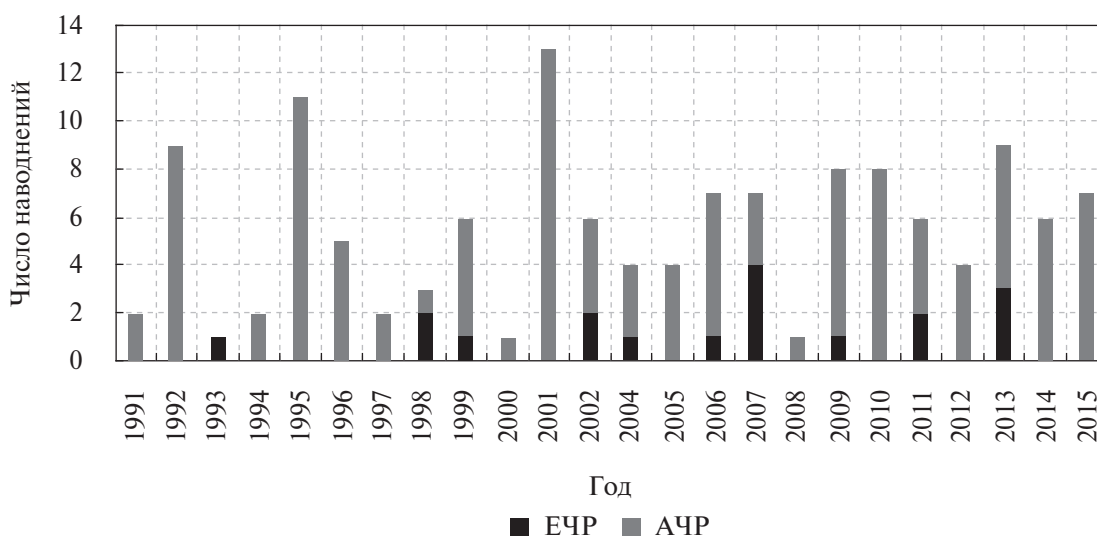


Рис. 1. Ежегодное число заторных наводнений в Российской Федерации с зафиксированным материальным ущербом.

бежных специалистов, например канадских [19], разработавших на примере трех рек провинции Квебек упрощенную геопространственную статистическую модель для оценки предрасположенности речных участков к процессам заторообразования [19].

Согласно методическим рекомендациям, подпор воды представляет собой повышение уровня воды, вызванное наличием в русле реки препятствий для движения водных масс [13]. Препятствия могут быть как антропогенного (гидротехнические и транспортные сооружения, запани), так и природного характера. В период весеннего половодья на реках, текущих с юга на север, подпоры на притоках от заторов в основном русле или от заторов на нижерасположенном участке, а также наличие кромки льда при запаздывании вскрытия нижних участков реки сказываются на процессе прохождения ледохода. Снижение скорости течения в зоне подпора создает условия для возникновения нового затора, формируемого из поступающих ледовых масс, либо сказывается на развитии затора, уже существующего выше по течению. Очевидно, что заторы, расположенные в зоне подпора, должны иметь свои особенности.

В 1970-е гг. в результате обобщения обширных материалов наблюдений за заторами и зажорами льда на стационарной сети гидрологических постов и авиаобследований участков рек с ледовыми затруднениями был составлен специализированный каталог [8], содержащий достаточно полную информацию о характеристиках заторных/зажорных участков рек и заторных/зажорных уровней воды. Результаты систематизации и обобщения данных, представленных в этом каталоге [8], позволили Р.В. Донченко установить основные закономерности распространения этих явлений на реках России и стран ближнего зарубежья.

Лоцманские карты и карты русловых съемок, используемые при составлении каталога [8], позволили привести в нем длину заторных и зажорных участков, с учетом места возникновения головы затора или зажора (которое год от года не является постоянным), имеющих протяженность от одного до нескольких километров без учета зоны подпора уровня. В описании каждого участка приведены плановые очертания русла и поймы, уклоны, влияние на уровневый и ледовый режим реки гидротехнических сооружений, ледовая и гидрометеорологическая обстановка, сопутствующая образованию заторов и зажоров, протяженность зоны подпора, вызван-

ного заторами или зажорами, наличие ущерба, вызываемого этими явлениями, и меры борьбы с ним. В описании также указаны факторы, способствующие заторообразованию на каждом из участков: переломы продольного профиля русла, морфологические особенности (острова, перекаты и т.д.) и искусственные препятствия, а также наличие ниже по течению кромки льда или подпорных явлений.

Влияние морфометрии речного русла на места возникновения заторов льда отмечалось в ранних исследованиях ледового режима рек и водоемов России. Заторы на р. Енисей вблизи отмелей и островов были описаны Г.Третьяковым еще в 1869 г., а в местах подводных препятствий, сужений и крутых поворотов — Е.В. Близняком в 1916 г. [4]. Положение русла реки в плане, строение и форма русла и берегов названы Ф.И. Быдиным также факторами, влияющими на заторообразование [7]. В работах Л.Г. Шуляковского отмечено, что для естественных мест уменьшения продольного уклона речного русла характерны морфологические особенности, способствующие возникновению заторов [17]. Створы и участки речных русел с крутыми поворотами, сужениями, островами, мелкими перекатами и порогами, согласно исследованиям И.Я. Лисера и В.Я. Марусенко, наиболее часто подвержены образованию заторов [11, 12]. Основные закономерности формирования ледовых явлений на реках бассейна Верхней и Средней Камы изложены в работе [9]. В исследованиях процессов заторообразования на реке Томь [1], помимо сложного сочетания гидрометеорологических и геоморфологических факторов, отдельно указываются антропогенные факторы, связанные, в том числе, с проведением противозаторных мероприятий и разработкой русловых карьеров.

Таким образом, заторообразование, а также гидрологические наводнения на реках, обусловленные возникновением заторов, — это многофакторные и не в полной мере изученные речные процессы. Анализ и количественная оценка факторов, влияющих на частоту возникновения ледовых заторов и параметры заторных наводнений, по-прежнему остается актуальным направлением современных гидрофизических исследований.

С учетом опасности реальной возможности возникновения заторов на реках севера ЕЧР и АЧР сформулированы следующие актуальные задачи исследований:

– выполнить оценку влияния подпора от нижележащих участков на параметры заторных наводнений на затороопасных участках рек и построить классификационные функции для участков с подпором и без него (на примере речного бассейна ЕЧР);

– оценить влияния характерных элементов строения речного русла на частоту образования заторов льда в пределах речного бассейна (на примере укрупненных речных бассейнов АЧР и ЕЧР).

Рассмотрим последовательно решение каждой из двух поставленных задач.

Морфометрическое строение русла и долины наряду с особенностями вскрытия водотока ото льда определяют высокую заторность рек бассейна Северной Двины. Заторные подъемы воды над уровнем межи в годы сильных ледовых затруднений могут составлять порядка 6.5–7.5 м. Гидрологической особенностью рек этого бассейна является значительный рост уровней воды в половодье и низкие уровни в межень. В весенний период формирование максимальных уровней воды обусловлено влиянием двух факторов [16]: таяние снега и подпор (затор или подпор притока главной реки). Указанные особенности рек бассейна Северной Двины позволили выбрать его в качестве объекта исследования для решения первой задачи.

Имеющиеся в открытом доступе [8] гидрологические данные по Северной Двине и 29 рекам, формирующим ее бассейн, были сведены в электронную базу данных по 82 участкам, для которых характерны ледовые затруднения. Это позволило быстро производить сортировку и группировку параметров наводнений, вызванных заторами или зазорами. Детальное описание участков, приведенное в [8], позволило выполнить отсев участков, в пределах которых имели место техногенные воздействия, или для которых период наблюдений был меньше, чем 10 лет. Характеристики участков приведены в табл. 1.

Из всех участков бассейна был отобран 41 участок, замерзающий по зазорному типу и характеризующийся возникновением заторов в период вскрытия реки ото льда. Именно здесь возможно возникновение заторов с достаточно большим и интенсивным ростом глубины. Статистические характеристики продолжительности наблюдений за ледовым режимом для этих участков следующие: среднее значение – 52, мода – 33 года, медиана – 49 лет. Только 3

**Таблица 1.** Участки рек бассейна Северной Двины с ледовыми затруднениями

Ледовые явления	Количество участков		
	с подпором	без подпора	всего участков
Ледовые затруднения	31	51	82
Заторы	7	34	41
Зажоры и заторы	24	17	41

участка имели по 10, 12 и 14 лет наблюдений, все остальные (93%) – 20 и более лет. Подпор от нижерасположенных створов с частотой возникновения не ниже 4.5% зафиксирован на 24 участках. Остальные 17 участков не испытывали подпора от нижерасположенных створов за весь период наблюдений.

Для решения задачи использован один из методов многомерного анализа данных – дискриминантный (или разделительный) анализ. Предварительно заданные группы заторно-зазорных участков (в которых сказывалось влияние подпора в период весеннего вскрытия, и в которых подпора от нижележащих участков не возникало) сопоставлены по факторам, которым соответствовали переменные:  $x_1$  – повторяемость заторов, %;  $x_2$  – среднее многолетнее значение наибольшего заторного подъема уровней воды, м;  $x_3$  – отношение средних многолетних значений высших незаторного уровня над меженью к заторному уровню над меженью;  $x_4$  – отношение средних многолетних значений высших зазорного уровня над меженью к незазорному уровню над меженью.

Выбор дискриминантных переменных выполнен на основании общепринятых положений о параметрах, характеризующих вскрытие речного русла ото льда и возникновение заторно-зазорных явлений. Необходимо было найти такую линейную комбинацию переменных  $x_1$ – $x_4$ , которая разделила бы все участки речного бассейна на две группы: в первой группе возникает влияние подпора в период вскрытия ото льда, во второй группе подпор от нижележащих участков отсутствует.

Общий вид дискриминантной функции для всех речных участков принимался линейным:

$$d_{km} = \beta_0 + \beta_1 x_{1km} + \beta_2 x_{2km} + \beta_3 x_{3km} + \beta_4 x_{4km}, \quad (1)$$

где  $d$  – значение функции для  $m$ -го объекта (участка реки) в группе  $k = 1$  (с влиянием под-

пора) или  $k = 2$  (без влияния подпора);  $\beta$  – коэффициенты, значения которых необходимо определить;  $x$  – значение каждой из четырех дискриминантных переменных для  $m$ -го участка реки в группе 1 или 2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведения дискриминантного анализа коэффициенты  $\beta$  в функции (1) выбирались таким образом, чтобы центры масс двух групп участков имели наибольшие различия, а межгрупповая дисперсия была больше внутригрупповой.

При четырех переменных дискриминантные функции представляют собой гиперповерхности в четырехмерном пространстве. Проекция элементов совокупностей на плоскости  $X_3O X_2$  и  $X_1O X_2$ , проходящие через начало координат (трехмерное пространство), приведены на рис. 2 и 3.

Очевидно, что для речных участков, испытывающих и не испытывающих влияние подпора, проекции множества точек, характеризующие конкретные значения переменных, образуют различные группы.

Дискриминантный анализ был выполнен в пакете STATISTICA. Группирующая переменная  $x_5$  имела два значения: “подпор” и “нет (отсутствие) подпора”. Использовался стандартный метод выбора значимых переменных. Совокупная (обучающая) выборка включала в себя 15 участков без влияния подпора и 12 участков, в которых подпор оказывал влияние на вскрытие реки (всего 78% от числа участков с заторно-зажорными явлениями). Критериями включения значений факторов в выборку стало наличие многолетних данных о повторяемости заторов и характерных глубинах

воды, а также отсутствие на участке регулирующих сооружений.

Значимость дискриминантной функции проверена с помощью статистики Уилкса. Значение  $\Lambda = 0.14$  соответствует удовлетворительной дискриминации (левый предел статистики равен 0, правый 1); при уровне значимости 0.05 значение  $F$ -критерия равно 2.817. Выбранное значение 19.585 значительно больше критического, следовательно, разделение совокупности на группы корректно.

Качество классификации оценивалось по классификационным матрицам. Совокупная (обучающая) выборка позволила достичь 100%-го коэффициента результативности (в том числе по каждой группе), что выше принятого в практике удовлетворительного значения, равного 70% [3]. В результате расчетов доказаны различия между участками с подпором и без него и получена возможность интерпретации имеющихся результатов.

Связи между переменными и дискриминантными функциями оценены на основании матрицы факторной структуры. Абсолютные значения коэффициентов корреляции между каждой из четырех переменных и дискриминантной функций находятся в пределах от 0.3 до 0.8. Наименьшая значимая связь соответствовала фактору  $x_4$ , характеризующему относительные зажорные уровни.

Вклад каждой переменной в дискриминантную функцию оценивался по величине стандартизованного коэффициента  $\beta$ . Чем выше его значение, тем сильнее вклад фактора в дискриминацию совокупностей. Ранжированный ряд переменных по степени их вклада в дискриминантную функцию получился следующим: 1 – среднее многолетнее значение наибольшего заторного подъема уровней воды ( $x_2$ ); 2 – повто-

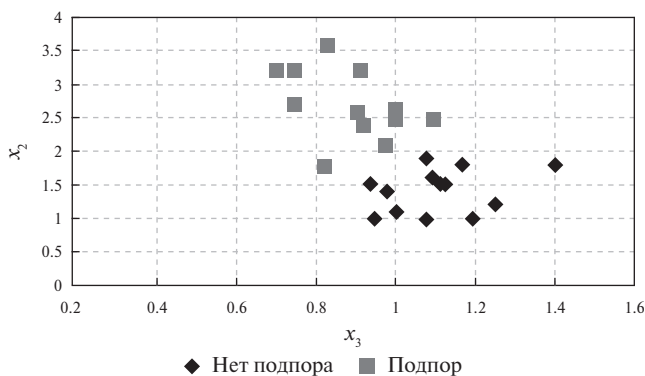


Рис. 2. Факторное поле относительных незаторных уровней и средних многолетних значений наибольших заторных подъемов уровней воды.

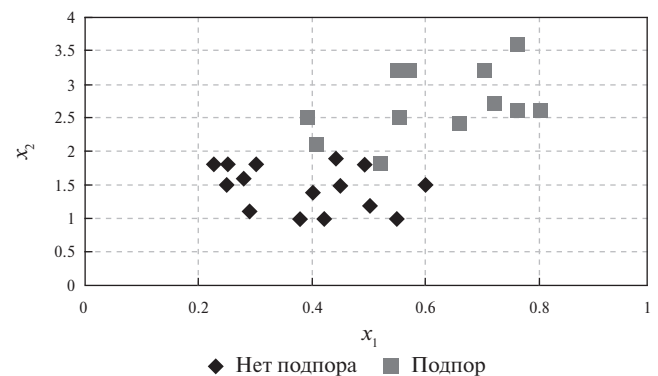


Рис. 3. Факторное поле повторяемости заторов и средних многолетних значений наибольших заторных подъемов уровней воды.

ряемость заторов ( $x_1$ ); 3 – отношение заторных уровней над меженью ( $x_3$ ); 4 – отношение зазорных уровней над меженью ( $x_4$ ).

На заключительном этапе решения первой задачи были построены классификационные функции для двух групп речных участков:

с влиянием подпора

$$S_1 = -97.06 + 52.58x_1 + 17.98x_2 + 92.89x_3 + 87.79x_4, \quad (2)$$

без влияния подпора

$$S_2 = -84.15 + 39.29x_1 + 11.28x_2 + 101.67x_3 + 87.21x_4. \quad (3)$$

Для классификации участков, не вошедших в совокупную (обучающую) выборку, необходимо подставить значения факторов в уравнения классификационных функций (2) и (3). По какой из зависимостей,  $S_1$  или  $S_2$ , будет получено наибольшее классификационное значение, к той группе и следует отнести речной участок.

По результатам применения методов дискриминантного анализа к данным многолетних наблюдений за ледовым и водным режимом рек бассейна Северной Двины были сделаны следующие выводы.

Гидрологические параметры заторных явлений для заторно-зазорных участков, находящихся в зоне влияния подпора от нижерасположенных речных створов, достоверно отличаются от параметров заторных явлений на участках, не подверженных влиянию подпора. При прочих равных условиях на участках с подпором повторяемость заторов в 1.3 раза выше, а средние наивысшие заторные подъемы уровня воды в 1.6 раз больше.

При анализе возникновения и развития заторного наводнения в рассмотрение следует

включать не только характерные заторные уровни воды, но и зазорные уровни. Влияние зазорных уровней одинаково для участков, имеющих подпор во время вскрытия и не имеющих подпора, что объясняется разнесением явлений заторов и зазоров льда во времени. Для участков, не испытывающих влияние подпора, отношение средних многолетних значений высшего незаторного уровня над меженью к заторному уровню над меженью выше в 1.1 раза.

Вторая задача, решаемая в ходе проведенных исследований, включала в себя оценку влияния различных элементов строения речного русла на частоту возникновения заторов льда в пределах трех укрупненных речных бассейнов как АЧР, так и ЕЧР, выполненную на основании данных [8]. Результаты решения задачи для двух укрупненных речных бассейнов АЧР опубликованы авторами ранее [10]. В настоящей работе приведены данные расчета по трем обобщенным бассейнам: рек побережья моря Лаптевых; Оби и рек, впадающих в Карское море между устьями Оби и Енисея; рек побережья Белого и Баренцева морей к востоку от устья Северной Двины. Сведения по участкам рек, входящих в три рассматриваемые бассейна, приведены в табл. 2.

На основании описания заторных участков, приведенного в [8], из рассмотрения исключались участки, в которых кроме факторов, отвечающих за морфологические особенности русла, действовали иные факторы, влияющие на процесс заторообразования, а именно:

- участки с осенними зазорами;
- устьевые участки;
- участки с влиянием подпора со стороны нижележащих створов;
- участки с гидротехническими и транспортными сооружениями;

**Таблица 2.** Участки рек укрупненных речных бассейнов с заторами в период вскрытия

Бассейны рек	Общее число участков	Расчетное число участков	Статистические характеристики рядов лет наблюдений по расчетным участкам			
			минимум / максимум	среднее	мода	медиана
Побережье моря Лаптевых	260	68	10 / 53	28	32	29
Обь и реки, впадающие в Карское море между устьями Оби и Енисея	101	45	10 / 80	27	19	21
Побережье Белого и Баренцева морей к востоку от устья Северной Двины	63	24	10 / 42	18	11	14

– участки, в пределах которых применялись меры по предотвращению заторов.

Согласно [15], морфометрическими характеристиками водотоков являются количественные показатели, описывающие размеры, форму и уклон водотоков. К ним относят длину, средний уклон, координаты продольного и поперечного профилей, извилистость. Коэффициент извилистости речных участков, включенных в выборку, лежал в пределах 1.02–1.61 и более (от изогнутого до сильно извилистого). В результате жесткого отбора по всем перечисленным параметрам в расчет было включено только 26% общего числа участков по первому укрупненному речному бассейну, 45% по второму и 38% по третьему бассейну.

Статистические характеристики длины участков, вошедших в расчет, приведены ниже. Для первого укрупненного речного бассейна средняя длина участка составила 8.7 км, медиана – 3.5 км, мода – 2 км, длину 4 км и меньше имели 60% участков. Для второго укрупненного речного бассейна средняя длина участка составила 5.5 км, медиана – 3 км, мода – 2 км, длину 4 км и меньше имели 68% участков. Для третьего укрупненного речного бассейна средняя длина участка составила 8.8 км, медиана – 7 км, мода – 5 км, длину 7 км и меньше имели 50% участков. Для рек побережья Белого и Баренцева морей к востоку от устья Северной Двины, формирующих третий укрупненный бассейн, характерно преобладание равнинного рельефа, что объясняет большую протяженность затороопасных участков.

Для решения задачи использовался один из методов многомерного анализа данных – множественный регрессионный анализ с фиктивными переменными, соответствующими определенным видам морфометрии русла.

Особенности строения речного русла были объединены в три типичные группы, каждой из которых была поставлена в соответствие своя бинарная переменная:

$x_1$  – изменение речного русла в плане (крутой поворот, излучина, меандр);

$x_2$  – деление речного потока (разветвления, рукава, острова);

$x_3$  – изменение глубин речного потока (плесы, перекаты, пороги, отмели).

При наличии в пределах рассматриваемого участка хотя бы одного характерного морфометрического элемента бинарная переменная при-

нимала значение, равное 1, в противном случае она была равна 0.

Общий вид используемого уравнения множественной регрессии следующий:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3, \quad (4)$$

где  $y$  – частота возникновения заторов в пределах речного участка;  $x_i$  – бинарные переменные, соответствующие определенным особенностям морфометрии речного русла;  $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты регрессии, значения которых необходимо определить для укрупненного речного бассейна.

Особенностью спецификации модели (4) является отсутствие свободного члена. Это обусловлено тем, что модель неприменима для прогноза частоты образования заторов льда в зависимости от тех или иных особенностей строения русла, она только позволяет оценить степень их влияния на исследуемый показатель. В выборку не включались прямолинейные речные участки, поэтому при равенстве всех бинарных переменных нулю функция отклика  $y$  также должна принимать нулевое значение.

Расчеты, выполненные в пакете STATISTICA, позволили получить следующие регрессионные уравнения:

для бассейна рек побережья моря Лаптевых:

$$y = 0.33x_1 + 0.42x_2 + 0.30x_3, \quad (5)$$

для бассейна Оби и рек, впадающих в Карское море между устьями Оби и Енисея:

$$y = 0.22x_1 + 0.26x_2 + 0.20x_3, \quad (6)$$

реки побережья Белого и Баренцева морей к востоку от устья Северной Двины:

$$y = 0.33x_1 + 0.44x_2 + 0.27x_3. \quad (7)$$

Статистические оценки качества полученных уравнений были хорошими. Значение коэффициента детерминации  $R^2$  оказалось достаточно высоким по всем речным бассейнам (0.75, 0.70 и 0.77 соответственно), т.е. высокая частота ледовых заторов объясняется влиянием морфометрических особенностей речного участка. Теснота связи результирующего показателя и включенных в модель факторов была также высокой (коэффициенты множественной корреляции  $R = 0.86, 0.84$  и  $0.88$ ). Все уравнения адекватны по критерию Фишера  $F$  (значимость  $F \ll 0.05$ ). Все коэффициенты регрессии значимы по критерию Стьюдента (значения для коэффициентов  $p < 0.05$ ). Стандартные ошибки коэффициентов регрессии равны соответ-

ственно: в уравнении (5) — 0.08, 0.07 и 0.07; в уравнении (6) — 0.06, 0.06 и 0.05; в уравнении (7) — 0.09, 0.09 и 0.12. Следовательно, уравнения (5), (6) и (7) пригодны для дальнейшего более глубокого инженерно-гидрологического анализа.

Коэффициенты при бинарных переменных в полученных выше уравнениях различны. Это может быть связано с особенностями геоморфологического и гидрогеологического строения речных русел, характеристиками речных водосборов, различиями климатических условий и особенностями прохождения фаз и периодов ледового режима в каждом из речных бассейнов. Ранжирование значений коэффициентов регрессии при одинаковых переменных в уравнениях (5), (6) и (7) показало, что степень влияния морфометрических особенностей русел на частоту образования заторов не зависит от типа речного бассейна. Более частые заторы на участках с различной степенью извилистости возникают при делении речного потока (наличии разветвления, рукава, острова); далее следуют плановые изменения русла (крутой поворот, излучина, меандр) и только потом изменение его глубин (плесы, перекаты, пороги, отмели).

Сравнить степени влияния факторов между собой возможно при вычислении парных отношений коэффициентов регрессии (табл. 3).

Отношения коэффициентов при переменных, соответствующих морфометрическим особенностям, влияющим на частоту заторообразования, полученные для укрупненных речных бассейнов, не только имеют одинаковые ранги, но и сопоставимы между собой (для бассейнов рек АЧР разница составляет 7–8%, одновременно по бассейнам рек ЕЧР и АЧР — от 3 до 25%).

Анализ моделей множественной регрессии позволил оценить влияние морфометрических особенностей речного русла на частоту образования заторов льда в пределах трех укрупненных речных бассейнов АЧР и ЕЧР и сформулировать ряд выводов.

Ранжирование морфометрических факторов (особенностей) по степени их влияния на частоту образования заторов льда на участках с различной степенью извилистости не зависит от выбранного укрупненного речного бассейна.

Наибольшее влияние на частоту возникновения заторов льда имеет разделение речного потока (русла), затем следуют изменения русла в плане и изменение глубин речного потока.

При прочих равных условиях разделение речного потока (русла) в 1.2–1.3 раза сильнее влияет на частоту образования заторов льда для всех рассмотренных укрупненных речных бассейнов, чем изменение русла в плане.

Разделение речного потока влияет на частоту образования заторов в 1.3–1.4 раза сильнее для бассейна рек АЧР и в 1.6 раза сильнее для рек ЕЧР, чем изменение глубин потока.

Изменения речного русла в плане в 1.1 раза сильнее влияют на частоту заторообразования, чем изменение глубин для всех рассмотренных укрупненных речных бассейнов.

## ВЫВОДЫ

Анализ и оценка факторов, влияющих на частоту возникновения ледовых заторов и параметры заторных наводнений, — актуальное направление гидрофизических исследований.

**Таблица 3.** Соотношения коэффициентов регрессионных уравнений в моделях частоты ледовых заторов

Характерные отношения	Бассейн рек побережья моря Лаптевых	Бассейн р. Оби и рек, впадающих в Карское море между устьями Оби и Енисея	Реки побережья Белого и Баренцева морей к востоку от устья Северной Двины
$x_2/x_1$ отношение влияния разделения речного потока к изменению русла в плане	1.3	1.2	1.3
$x_2/x_3$ отношение влияния разделения речного потока к изменению глубин русла	1.4	1.3	1.6
$x_1/x_3$ отношение изменений русла в плане к изменению глубин потока	1.1	1.1	1.2



Для количественной оценки влияния подпора от нижележащих створов на параметры заторных наводнений на затороопасных участках рек предложено использовать один из методов многомерного анализа данных — дискриминантный анализ. Доказано, что гидрологические параметры заторных явлений для заторно-зажорных участков, находящихся в зоне влияния подпора от нижерасположенных речных створов, достоверно отличаются от параметров заторных явлений на участках, не подверженных влиянию подпора. При прочих равных условиях на участках с подпором повторяемость заторов в 1.3 раза больше, а средние наивысшие заторные подъемы уровня воды в 1.6 раз больше. Влияние зажорных уровней одинаково для участков, имеющих подпор в период вскрытия, и участков, не имеющих подпора.

Для решения задачи влияния различных элементов морфометрического строения речного русла на частоту возникновения заторов льда в пределах укрупненных речных бассейнов АЧР (на побережье морей Северного Ледовитого океана) и ЕЧР предложено использовать множественный регрессионный анализ с фиктивными переменными. Результаты анализа показали, что наибольшее влияние на частоту возникновения заторов льда, последовательно убывая, имеют такие морфометрические факторы, как разделение речного русла, изменения русла в плане и изменение глубин речного потока.

Применение методов многомерного анализа данных к задачам оценки изменчивости условий и причин заторообразования на реках России позволит повысить эффективность прогнозирования ледового режима водных объектов, диагностирования ледовых затруднений и их последствий, а также типизации сложных и многофакторных явлений образования заторов и зажоров льда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. докл. и кратких сообщений. Ижевск, 2012. С. 4–12.
2. *Агафонова С.А., Фролова Н.Л.* Ледовый режим рек России: особенности, оценка опасности // Сб. науч. тр. конф. “Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения”. М.: ИВП РАН, РосИНВХЦ, 2017. С. 469–474.
3. *Барковский С.С., Захаров В.М., Лукашов А.М., Нуртудинова А.Р., Шалагин С.В.* Многомерный анализ данных методами прикладной статистики: Уч. пособие. Казань: Изд-во КГТУ, 2010. 126 с.
4. *Близняк Е.В.* Река Енисей от Красноярска до Енисейска. Ч. II. Зимнее состояние реки. СПб., 1916. 79 с.
5. *Бузин В.А.* Зажоры и заторы льда на реках России. СПб.: Изд-во ГГИ, 2016. 242 с.
6. *Бузин В.А.* Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеиздат, 2004. 196 с.
7. *Быдин Ф.И.* Вскрытие и замерзание рек // Тр. ГГИ. 1933. Вып. 9. С. 42–48.
8. Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1976. Т. 1. 260 с.
9. *Калинин В.Г.* Ледовый режим рек и водохранилищ бассейна Верхней и Средней Камы. Пермь: ПГНИУ, 2008. 252 с.
10. *Кулешов С.Л., Козлов Д.В.* Анализ влияния морфометрии русла на частоту образования весенних заторов льда в пределах речного бассейна // Природообустройство. 2017. № 5. С. 15–19.
11. *Лисер К.Я.* Весенние заторы льда на реках Сибири. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 105 с.
12. *Марусенко И.Я.* Влияние ледовых образований на гидравлическое сопротивление потоков рек и каналов. Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1981. 159 с.
13. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.
14. *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.
15. Руководство по определению гидрографических характеристик картометрическим способом. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 91 с.
16. *Терский П.Н., Фролова Н.Л.* Наводнения на реках севера европейской территории России (на примере бассейна р. Северная Двина) // Изв. РАН. Сер. географическая. 2011. № 3. С. 94–105.
17. *Шуляковский Л.Г.* О заторах льда и заторных уровнях воды при вскрытии рек // Метеорология и гидрология. 1951. № 7. С. 45–49.
18. Сведения о неблагоприятных условиях погоды и опасных гидрометеорологических явлениях, нанесших социальные и экономические потери на территории России // URL: <http://meteo.ru/data/310-#доступ-к-данным> (дата обращения 10.06.2018).
19. *De Munck S., Gauthier Y., Bernier M., Chokmani K., Legare S.* River predisposition to ice jams: a simplified geospatial model. [https://www.researchgate.net/publication/311483738\\_River\\_predisposition\\_to\\_ice\\_jams\\_a\\_simplified\\_geospatial\\_model.1](https://www.researchgate.net/publication/311483738_River_predisposition_to_ice_jams_a_simplified_geospatial_model.1)

## Multidimensional Data Analysis of Jamming Factors in River Basins

D. V. Kozlov<sup>1, \*</sup>, S. L. Kuleshov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *National Research Moscow State University of Civil Engineering  
Russia 129337 Moscow*

<sup>2</sup> *Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy  
Russia 127550 Moscow  
\*e-mail: kozlovdv@mail.ru*

Received: 16.01.2018 г.

Accepted: 26.04.2018 г.

The analysis and quantitative assessment of factors affecting the frequency of ice jams and the parameters of flood congestion is an important area for hydrophysical study. The influence on flood-congestion parameters of backwaters identified in the lower cross-sections on sections of rivers prone to jamming was estimated by applying discriminatory analysis to the data of long-term observations of the water regime of the rivers in the Northern Dvina basin. Additionally, methods of classification of characteristic areas were developed. In addition, models derived by multiple regression analysis made it possible to assess the influence of the morphometric features of the riverbed on the frequency of ice jams within the two large river basins in the European and Asian parts of Russia.

**Keywords:** river basin, ice jam, jamming factors, congestion flood, discriminant analysis, multiple regression models.

**DOI:** 10.31857/S0321-0596462132-141