

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

# ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОЛОГИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УГР ВОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ TECHNOLOGIES OF ENGINEERING HYDROLOGY TO REDUCE THREA TO WATER SECURITY ON WATER BODIES

**Круглый стол «Наука и инновационные технологии на службе водной безопасности» (посвящен памяти проф. В.А. Духовного)**

26-27 апреля 2022 г., г. Туркестан, Республика Казахстан

**Дмитрий Козлов**

заведующий кафедрой ГиГС НИУ МГСУ

**Dmitry Kozlov**



## Актуальность темы

- **Водная безопасность** - важнейший вызов современности. Для национальной безопасности России водный фактор связан, в первую очередь, с такими источниками рисков как аварии на гидротехнических сооружениях и наводнения, вызванные опасными гидрологическими явлениями (ОГЯ). ОГЯ встречаются в подавляющем большинстве стран мира.
- В России ущерб от всех возможных гидрометеорологических явлений составляет 80–90% от общего ущерба природного характера. При этом наводнения, вызванные половодьем, паводками, зажорными заторными явлениями, входят в «тройку лидеров» ОГЯ, оказывающих «поражающее воздействие на людей, отрасли экономики и окружающую природную среду».
- В 2018 году Росгидромет зафиксировал на территории России 1040 опасных гидрометеорологических явления (на 131 явление больше, чем в 2017 году), из которых 465 явлений нанесли значительный ущерб объектам жизнедеятельности (Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году», 2019). Роль каждого из возможных источников чрезвычайной ситуации, сопровождающейся возникновением значительного материального ущерба, различна и уникальна как во времени, так и по территории страны.
- За последние 25 лет в России зарегистрировано более 130 заторных наводнения с зафиксированным материальным ущербом. Масштабы ущербов различны: от максимальных весной 2001 года на р. Лене до незначительных - в малонаселенных бассейнах рек Крайнего Севера.

- Несмотря на математического моделирования, а также мониторинга и последствий их образования как на естественных, так и на зарегулированных участках рек, в том числе при наличии инженерных сооружений, для снижения угроз водной безопасности, является
- актуальной проблемой инженерной гидрологии**
- достаточную изученность гидрологического, в том числе ледового режима рек, процессов заторо- и зажорообразования, исследование причин и особенностей образования опасных ледовых явлений, анализ достижений в области разработки и применения методов расчёта и прогноза их количественных характеристик, физического, и

Фото "Томскгеомониторинг" (2010-2011 гг.)



## **Технологический комплекс инженерной гидрологии** включает в себя:

- ❑ **мониторинг** поверхностных и подземных вод, включая наблюдения (в том числе систему сбора и передачи информации) и измерения физико-географических характеристик;
- ❑ **технологии** управления водными ресурсами;
- ❑ **статистический анализ** гидрологических данных;
- ❑ **моделирование** гидрологических (в том числе гидравлических) систем;
- ❑ гидрологические **прогнозы**.

### **Задачи исследования:**

- 1. поиск статистически значимых трендов в исторических сроках формирования ледостава и вскрытия ото льда (на основе статистического анализа характеристик ледового режима

устьевого участка р. Северной Двины в ретроспективном периоде);

- 2. классификация субъектов Российской Федерации по спектру опасных гидрологических и ледовых явлений (заторов и зажоров льда) с зафиксированным материальным ущербом, статистическая оценка многолетней динамики этих явлений и заблаговременности их прогнозов в каждом из регионов;
- 3. качественная и количественная оценка факторов, повлиявших на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на зарегулированном участке реки (на основе результатов мониторинга гидрометеорологической обстановки и гидрологической ситуации в бассейне р. Волги ниже Рыбинского гидроузла);
- 4. математическое моделирование речного потока в районе мостового перехода в условиях формирования затора льда (на участке реки Волги для оценки скоростей течения и уклонов водной поверхности).

## Общая методология и методы исследования

- методологические подходы, основанные на фундаментальных положениях инженерной гидрологии и методах научно-познавательной деятельности: эмпирическом (пассивном эксперименте) и универсальных общелогических методах (анализе, синтезе, обобщении и т.п.), а также методах математического моделирования гидрологических и гидравлических процессов, математической статистики, многомерного анализа и экспертных оценок

*Как снизить угрозу водной безопасности?*







- **Ледовый режим рек России**, как часть гидрологического режима реки, подвергся в XX-XXI веках существенному изменению, в том числе из-за интенсивного антропогенеза и климатических изменений. Для того чтобы оценить последние современные изменения ледового режима, необходимо провести ретрансформацию информации о ледовом режиме водотоков в прошлом.
- Непрерывные данные о ледовом режиме российских рек имеются, начиная с первой половины XVIII века. Так, например, информация о сроках установления ледостава и полного очищения Северной Двины ото льда известна с 1734 года.
- Впервые анализ многолетних наблюдений за сроками наступления ледовых явлений в бассейне этой реки выполнил К.С. Веселовский в 1857 году, а в 1868-69 гг. С.Ф. Огородников систематизировал эти сведения, указав на факторы, влияющие на высоту подъемов воды, связывая высоту весеннего разлива реки «...с быстротой таяния снега, толщиной и прочностью льда, силой или направлением ветра во время вскрытия нижней части реки» (Труды Архангельского Губернского статистического комитета за 1867 и 1868 г., 1868).
- Сегодня это общепринятые предикторы в моделях прогноза высоты заторных подъемов уровня воды (Бузин В.А., 2015).
- В этой же работе сделано предположение о возможности прогноза сроков замерзания и вскрытия: «вскрытие и замерзание рек находятся в неразрывной связи с температурой воздуха ...». Исследования С.Ф. Огородникова получили свое развитие в работах (Рыкачев М.А., 1886), (Орлов П.Н., 1915).
- **Информационной основой для поиска статистически значимых трендов в исторических сроках формирования ледостава и вскрытия на устьевом участке Северной Двины** послужили архивные сведения М.А. Рыкачева, дополненные данными П.Н. Орлова.

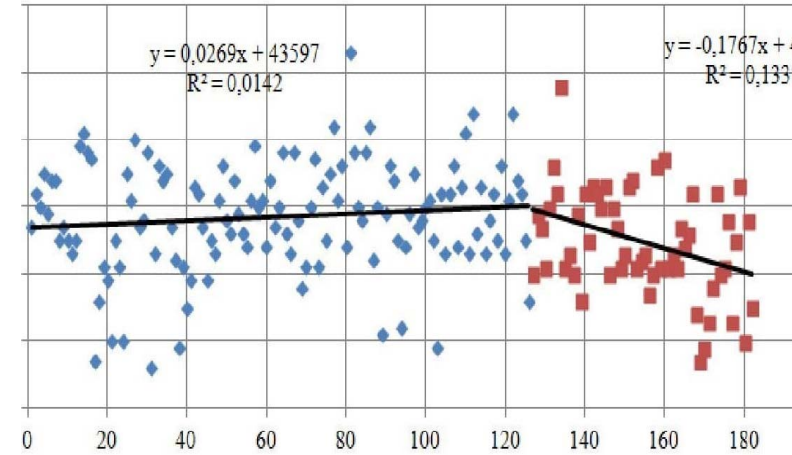
## Методы исследования для **области 1**

- Достижения прикладных математических наук и развитие теории ледовых процессов на современном этапе позволили по-новому оценить изменчивость ледового режима устья Северной Двины в исторической ретроспективе, исключая влияние антропогенных факторов. Методологической основой исследования стал многомерный анализ данных и методы математической статистики. Проверка значимости тренда выполнялась по рекомендациям Государственного гидрологического института

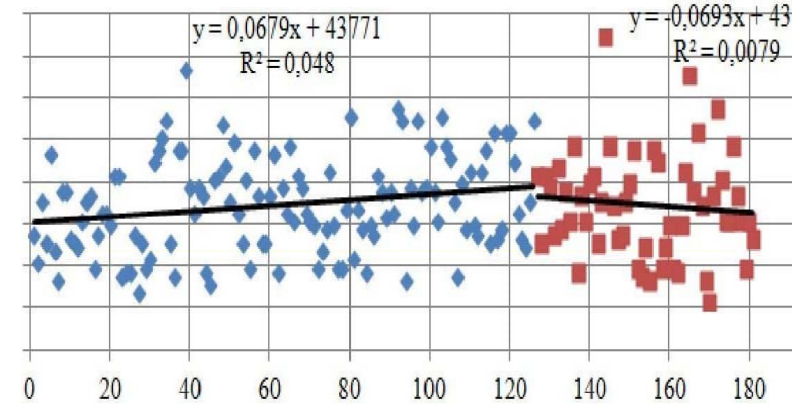




- **Тренд дат вскрытия** (с 15 апреля по 14 июня) на периоде 1734-1859 гг. статистически не значим, тренд на периоде 1860-1915 гг. статистически значим (коэффициент детерминации  $R^2$  больше 0,1; для модели парной линейной регрессии коэффициент детерминации равен квадрату обычного коэффициента корреляции между  $y$  и  $x$ ) на уровне как 5%, так и на уровне 1%.
- **Тренд дат замерзания** (с 12 октября по 21 декабря) на периоде 1734-1859 гг. статистически значим на уровне 5%, а на уровне 1% уже не значим. Тренд дат замерзания на периоде 1860-1915 гг. статистически не значим. Доказан сдвиг сроков вскрытия на периоде 1860-1915 гг. в сторону более ранних дат и сдвиг сроков замерзания на периоде 1734-1859 гг. в сторону более поздних дат.
- Анализ ретроспективных данных за 182 года (с 1734 по 1915 гг.) позволил исключить влияние техногенных и антропогенных факторов на оценку изменчивости ледового режима на устьевом участке реки Северная Двина. **Выявленные тенденции свидетельствуют о возможном потеплении климата в северных широтах.** Полученные результаты могут быть полезны для анализа длительных региональных и глобальных изменений климата. Аналогичные выводы о сдвигах сроков вскрытия и замерзания рек Средней Сибири были сделаны по результатам ретроспективного анализа двухсотлетних наблюдений.



Даты вскрытия на периодах 1734-1859 гг. («синим цветом») и 1860-1915 гг. («красным цветом») --- линейная зависимость (дата)



Даты замерзания на периодах 1734-1859 гг. («синим цветом») и 1860-1915 гг. («красным цветом») --- линейная зависимость (дата замерзания)





## Область исследования 2. Опасные гидрологические и ледовые явления на территории России

- **Особенности распределения ОГЯ**, в том числе и ледового генезиса, на территории России зависят в первую очередь от природно-климатических условий и характеристик антропогенной деятельности. Различные аспекты воздействия ОГЯ на природно-технические системы, оценки опасности наводнений на территории России и в ее субъектах рассматриваются, например, в работах (Гладкевич Г.И. и др., 2012), (Таратутин А.А., 2008), а использование методов многомерного анализа данных и ГИС-технологий при создании региональных информационно-картографических баз данных об ОГЯ изложено, например, в работе (Абдуллин Р.К., Шихов А.Н., 2017).
- **Исходным материалом исследований многолетней динамики опасных гидрологических и ледовых явлений** стали данные Росгидромета о неблагоприятных условиях погоды и опасных гидрометеорологических явлениях, нанесших социально-экономические потери на территории России за 29-летний период с 1991 по 2019 год (Официальный сайт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2020).
- **Общий массив данных об ОГЯ включал почти 1900 событий**



## Методы исследования для **области 2**

- Классификация субъектов России по видам, числу и частоте возникновения ледовых ОГЯ в развитии работы (Козлов Д.В. и др., 2021) была выполнена с использованием метода многомерного анализа данных – кластерного анализа. Для проверки стационарности многолетних рядов ОГЯ по кластерам, регионам и типам использовались методы регрессионного анализа.





- На территории России из 100% событий ОГЯ чаще всего материальный ущерб приносили паводки (33,3%) и половодья (29,8%), а случаи зафиксированного ущерба от заторов и зажоров льда составили 7,2% и 0,5% соответственно. Описательная статистика данных показала, что максимальное число видов ОГЯ, встречающихся в отдельном регионе (в 2% субъектов федерации), может достигать до шести (затор и зазор, низкая межень, паводок и половодье, сель).
- По каждому виду ОГЯ в пределах территории России были построены линейные тренды. Временная однородность ряда проверялась по рекомендациям Государственного гидрологического института (Методические рекомендации, 2010). При отношении  $r/(\sigma_r \geq 2)$  ( $r$  – коэффициент корреляции;  $\sigma_r$  – среднеквадратическая ошибка;  $n=29$  – число лет наблюдений) тренд признавался значимым на 5% уровне значимости  $\alpha$ , при отношении  $r/(\sigma_r \geq 3)$  тренд признавался значимым на 1% уровне значимости  $\alpha$  (Методические рекомендации ГГИ, 2010). Окончательный вывод о значимости тренда или нестационарности ряда делался при одинаковых выводах как для  $\alpha = 5\%$ , так для  $\alpha = 1\%$ . Результаты оценки значимости трендов по всем видам ОГЯ, в том числе ледовым заторам, приведены в таблице. За период 1991-2019 гг. все анализируемые ОГЯ с зафиксированным материальным ущербом имели тенденции к росту, но тренды были признаны статистически незначимыми как на 5%, так и на 1% уровнях значимости.

**Значимость линейных трендов опасных гидрологических и ледовых явлений за 1991-2019 гг.**

Виды ОГЯ	Уравнение тренда	$r$	$\sigma_r$	$r/\sigma_r$
Затор льда	$y = 0,0546x + 4,4507$	0,13	0,19	0,71
Все виды опасных гидрологических явлений	$y = 1,0128x + 50,015$	0,34	0,17	2,03



- Используя кластерный анализ, **ОГЯ были объединены в 4 типичные группы**: ледовые затруднения (зажоры, заторы, раннее ледообразование), высокие воды (половодья и паводки), сели, низкая межень. Комбинация перечисленных явлений для каждого субъекта особенна. Каждый из 85 субъектов России был отнесен к одному из девяти кластеров в зависимости от комбинации типов ОГЯ, которые в различные годы наносили региону материальный ущерб (Козлов Д.В. и др., 2021).
- Перечень кластеров, в комбинации типов ОГЯ которых входят ледовые затруднения (заторы и зажоры, раннее ледообразование), приводится ниже в ранжированном порядке:
  1. **Кластер №3** (ледовые затруднения, высокие воды) - 13 субъектов (16% из 100% всех субъектов федерации),
  2. **Кластер №4** (ледовые затруднения, высокие воды, низкая межень) - 8 субъектов (9,9% из 100% всех субъектов федерации),
  3. **Кластер №1** (ледовые затруднения, высокие воды, сели, низкая межень) - 3 субъекта (3,7% из 100% всех субъектов федерации),
  4. **Кластер №2** (ледовые затруднения, высокие воды, сели) - 2 субъекта (2,5% из 100% всех субъектов федерации).
- В регионах, на территории которых зафиксировано два или более типа ОГЯ, иногда значительно отличается частота их возникновения. За рассматриваемый период с 1991 по 2019 год одни субъекты федерации могли в большей степени нести материальные потери от высоких вод, другие - от ледовых затруднений и т.д. Поэтому внутри кластеров № 3, 4, 1 и 2 выполнена более детальная типизация субъектов по доле ОГЯ каждого типа в их общем числе.
- Разбиение субъектов на группы внутри указанных кластеров выполнялось с применением кластерного анализа в программе STATISTICA с использованием метода К-средних и группировки на постоянных интервалах. Результаты кластеризации приведены в таблице.





## Результаты и обсуждение. Классификация субъектов Российской Федерации по спектру опасных гидрологических и ледовых явлений

- Типизация субъектов внутри кластеров по частоте ОГЯ каждого типа приведена в таблице.

%-ное соотношение случаев ОГЯ	Субъекты Российской Федерации внутри каждого выделенного кластера
<b>Кластер №3 (ледовые затруднения / высокие воды)</b>	
10% / 90%	Омская область, Пензенская область, Приморский край, Ульяновская область
30% / 70%	Ленинградская область, Мурманская область, Ненецкий автономный округ, Оренбургская область, Псковская область, республика Татарстан
47% / 53%	Архангельская область, Ивановская область, республика Хакасия
<b>Кластер №4 (ледовые затруднения / высокие воды / низкая межень)</b>	
42% / 57% / 1%	Красноярский край, Республика Саха (Якутия)
10% / 40% / 50%	Новосибирская область, Томская область
10% / 75% / 15%	Амурская область, Кемеровская область, Тюменская область, Хабаровский край
<b>Кластер №1 (ледовые затруднения / высокие воды / сели / низкая межень)</b>	
20% / 75% / 2% / 3%	Республика Алтай
24% / 70% / 5% / 1%	Алтайский край
5% / 50% / 35% / 10%	Краснодарский край
<b>Кластер №2 (ледовые затруднения / высокие воды / сели)</b>	
25% / 70% / 5%	Забайкальский край
10% / 70% / 20%	Республика Дагестан



- Внутри каждого кластера в зависимости от доли ОГЯ каждого типа субъекты Российской Федерации были также разбиты на группы. К примеру, кластер №3 объединяет регионы, для которых материальный ущерб наносят такие типы ОГЯ, как ледовые затруднения и высокие воды. В Омской, Пензенской и Ульяновской области, а также Приморском крае в среднем только 10% из всех случаев зафиксированного материального ущерба вызывали ледовые затруднения, остальные 90% случаев приходились на паводки и половодья. А в кластере №4, объединяющем другие субъекты федерации, материальный ущерб наносят такие типы ОГЯ, как ледовые затруднения, высокие воды и низкая межень. Например, в Новосибирской и Томской областях в среднем 10% из всех случаев зафиксированного материального ущерба вызывали ледовые затруднения, 40% случаев приходились на паводки и половодья, а 50% случаев приходились на низкую межень. В Красноярском крае и Республике Саха (Якутия) в среднем 42% из всех случаев зафиксированного материального ущерба вызывали ледовые затруднения, 57% случаев приходились на паводки и половодья, а остальные 1% случаев приходились на низкую межень.
- Применение методов кластерного анализа позволило провести районирование территории России по преобладающим видам ОГЯ (в том числе, ледовых) и оценить степень подверженности субъектов федерации их воздействию. Полученная информация позволяет оценить территориальные риски, обусловленные ОГЯ, и своевременно выявить негативные процессы, возможное проявление которых может повлиять на возникновение и развитие чрезвычайных ситуаций на водных объектах и прилегающих территориях. Значительной части субъектов федерации наносят материальный ущерб половодья, паводки и ледовые затруднения (заторы и зажоры льда). Поэтому организация мониторинга именно этих ОГЯ на территории России является приоритетной.



## Область исследования 3. Факторы, влияющие на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на зарегулированном участке реки

- Важную роль в формировании катастрофических наводнений на реках играют ледовые заторы. Особенности, причины и последствия образования ледовых заторов как на естественных, так и на зарегулированных участках рек исследуются на протяжении нескольких десятилетий (Донченко Р.В., 1987, Готлиб Я.Л. и др., 1983, Ashton, G.D. (ed.), 1986), в том числе на зарегулированных реках и выполненные в последние годы (Бузин В.А., Зиновьев А.Т., 2009, Козлов Д.В., Кулешов С.Л., 2019) показали, что развитие зажорных явлений при образовании ледяного покрова и заторных явлений при его разрушении обусловлено, главным образом, наличием переломов продольного профиля реки, повышенных уклонов и скоростей течения на речном участке в сочетании с колебаниями режима пусков на ГЭС. Условия образования заторов на зарегулированном участке реки отличаются от бытовых условий заторообразования наличием предпаводочной сработки уровня воды. Одним из главных факторов заторообразования является недостаточная льдо- и водопропускная способность русла, связанная с его морфологическими особенностями.
- Для выполнения оценки факторов, повлиявших на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на р. Волге ниже Рыбинского гидроузла в районе г. Ярославль в феврале 2020 года в сравнении с аналогичной затороопасной ситуацией, сложившейся зимой 2007 года, были собраны и проанализированы результаты мониторинговых наблюдений, полученных на основе оперативных сводок Министерства по чрезвычайным ситуациям России, ПАО «РусГидро» и Росгидромета, а также сведений Росводресурсов о водохозяйственной обстановке на территории Верхне-Волжского бассейнового водного управления и режимах работы водохранилищ Волжско-Камского каскада.
- Фактор недостаточной пропускной способности русла является относительно постоянным, но в ситуации с рассматриваемым случаем 2020 года на речном участке Нижегородского водохранилища р. Волги в Ярославской области сыграл решающую роль в формировании ледового затора.

### Методы исследования для **области 3**

- Обобщение особенностей процессов заторообразования на зарегулированных участках рек, а также оценка гидрологической ситуации и ледовой обстановки с анализом причин и последствий заторообразования на речном участке Горьковского водохранилища ниже Рыбинского гидроузла выполнены в результате проведения пассивного эмпирического эксперимента, использующего собранные и систематизированные метеорологические, гидрологические (о расходах и уровнях воды) данные и сведения о ледовых явлениях на реке, а также применения универсального (общелогического) метода – анализа и синтеза, индукции и дедукции, обобщения. Полезным в работе был проект Правил использования водных ресурсов Рыбинского и Горьковского водохранилищ на р. Волге.







## Результаты и обсуждение. Оценка факторов, повлиявших на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на зарегулированном участке реки

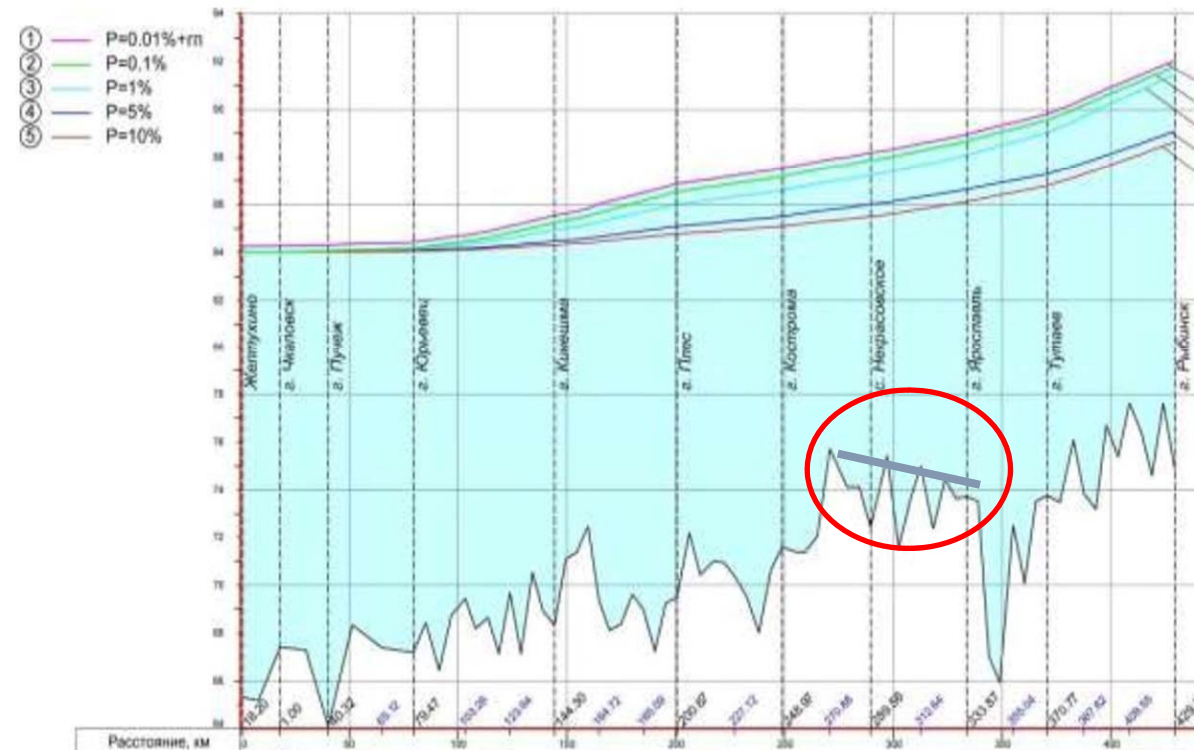
1

- На продольном профиле (рисунок) Нижегородского водохранилища виден 50-километровый «порожистый» с обратным уклоном дна участок русла в районе поселка Некрасовское на участке реки от Ярославля до Костромы. Кроме того, именно на этом участке Волги расположены крупные морфометрические преграды: несколько островов, сужений и поворотов русла. Указанные морфометрические преграды привели к стеснению живого сечения и зашугованности ее отдельных участков в этой части водохранилища. Сочетание неблагоприятных морфологических условий, чередование сильных оттепелей и значительных похолоданий, неустойчивый ледостав и кратковременный зимний ледоход на исключительно затороопасном участке в зоне выклинивания подпора уровня воды Нижегородского водохранилища в районе острова Мининский и привели к формированию ледового затора выше поселка Некрасовское. Образование затора вызвало значительное сужение живого сечения потока, но при этом снижение пропускной способности на затороопасном участке русла (с учетом дополнительного подъема уровня воды выше затора) не превысило 30-40%, а ледемерное обследование затора не проводилось.
- Решающую роль в формировании ледовых заторов на речном участке Нижегородского водохранилища как в 2020 году, так и в 2007 году, сыграл фактор недостаточной льдо- и водопропускной способности русла, связанный с морфологическими особенностями участка реки Волги. Время образования ледовых заторов как в феврале 2020 года, так и в январе 2007 года, однозначно совпало с периодами значительных колебаний сбросных расходов на Рыбинском гидроузле при общем их существенном росте. В обоих случаях во время формирования заторов осуществлялась сработка уровня воды у плотины гидроузла Нижегородского водохранилища более чем на 0,3-0,35 м за счет соответствующего увеличения сбросных расходов на Нижегородском гидроузле. Что лишний раз подтверждает исключительно негативное влияние предполоводной сработки уровня воды в водохранилище на условия и возможность образования ледовых заторов на зарегулированном участке реки выше гидроузла.



## Результаты и обсуждение. Оценка факторов, повлиявших на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на зарегулированном участке реки

- Величина максимального подъема заторных уровней в Волге в районе Ярославля в 2020 году почти на 1 м превысила максимум 2007 года при даже несколько меньших колебаниях сбросов из Рыбинского водохранилища. При весьма сходных погодных и гидрометеорологических условиях в обоих случаях основным отличием являлся «пониженный фон» уровней воды в верхнем бьефе у плотины Нижегородского гидроузла (в 2020 году в январе-феврале они были на 0,8 м ниже, чем в 2007 году). Поэтому при установлении режимов работы водохранилищ следует особо учитывать складывающуюся водохозяйственную и гидрометеорологическую обстановку с учетом анализа наблюдений за опасными гидрологическими явлениями на водном объекте. Результаты исследования были использованы при обосновании режимов функционирования водохранилищ Волжско-Камского каскада гидроузлов и разработке новой редакции правил использования водных ресурсов водохранилища.



Расчетные кривые свободной поверхности Нижегородского водохранилища на затороопасном участке реки Волга (Беднарчук С.Е., Козлов Д.В., 2020) 1, 2, 3, 4, 5 - уровни воды (м) для лет различной обеспеченности



## **Область исследования 4. Факторы и методы моделирования речных потоков в районе мостового перехода в условиях формирования затора льда**

- Важную роль в формировании катастрофических наводнений на реках играют ледовые заторы. Особенности, причины и последствия образования ледовых заторов как на естественных, так и на зарегулированных участках рек исследуются на протяжении нескольких десятилетий (Донченко Р.В., 1987, Готлиб Я.Л. и др., 1983, Ashton, G.D. (ed.), 1986), в том числе на зарегулированных реках и выполненные в последние годы (Бузин В.А., Зиновьев А.Т., 2009, Козлов Д.В., Кулешов С.Л., 2019) показали, что развитие зажорных явлений при образовании ледяного покрова и заторных явлений при его разрушении обусловлено, главным образом, наличием переломов продольного профиля реки, повышенных уклонов и скоростей течения на речном участке в сочетании с колебаниями режима пусков на ГЭС. Условия образования заторов на зарегулированном участке реки отличаются от бытовых условий заторообразования наличием предпаводочной сработки уровня воды. Одним из главных факторов заторообразования является недостаточная льдо- и водопропускная способность русла, связанная с его морфологическими особенностями.
- Для выполнения оценки факторов, повлиявших на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на р. Волге ниже Рыбинского гидроузла в районе г. Ярославль в феврале 2020 года в сравнении с аналогичной затороопасной ситуацией, сложившейся зимой 2007 года, были собраны и проанализированы результаты мониторинговых наблюдений, полученных на основе оперативных сводок Министерства по чрезвычайным ситуациям России, ПАО «РусГидро» и Росгидромета, а также сведений Росводресурсов о водохозяйственной обстановке на территории Верхне-Волжского бассейнового водного управления и режимах работы водохранилищ Волжско-Камского каскада.
- Фактор недостаточной пропускной способности русла является относительно постоянным, но в ситуации с рассматриваемым случаем 2020 года на речном участке Нижегородского водохранилища р. Волги в Ярославской области сыграл решающую роль в формировании ледового затора.

### Методы исследования для **области 4**

- Оценка ледовых воздействий на пропускную способность русла р. Волги и временный мостовой переход в строительный период выполнялась методом математического моделирования речного потока в районе мостового перехода в условиях ледового затора с использованием российского программного комплекса STREAM 2D CUDA (Алексюк А.И., Беликов В.В., 2017), основанного на численном решении уравнений мелкой воды в двумерной (плановой) постановке и простейшей модели, не учитывающей упругие свойства льда.







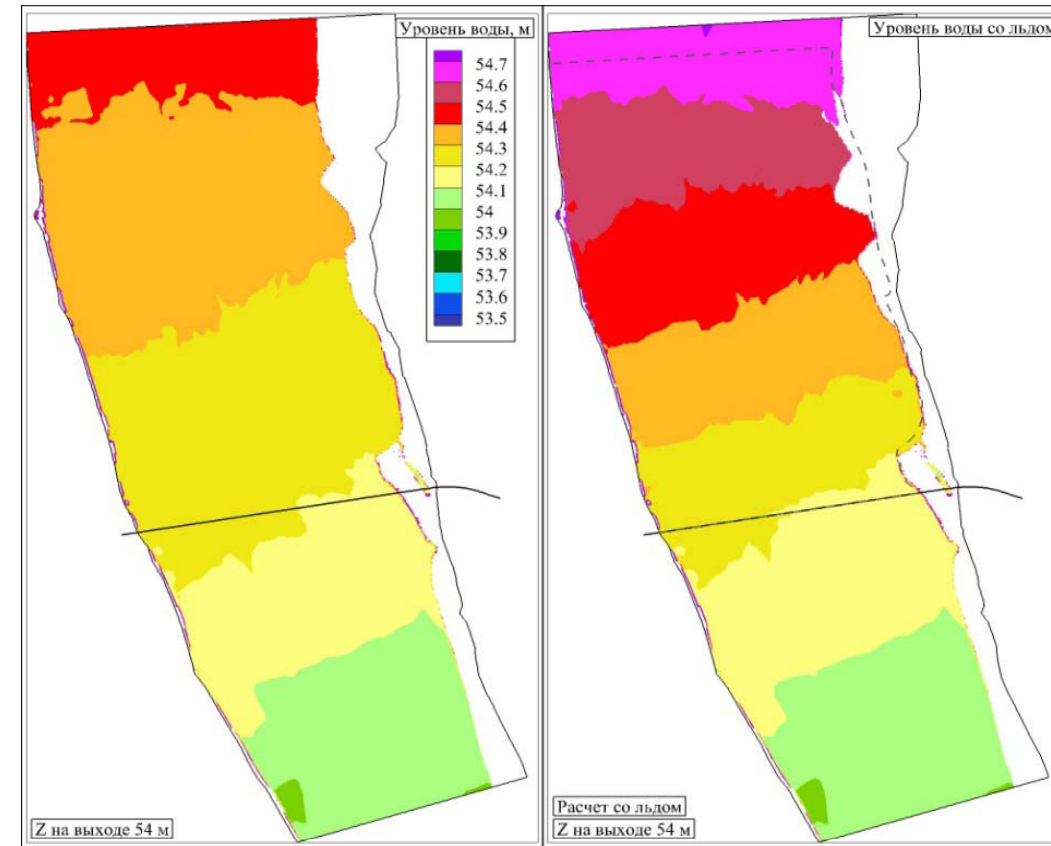
- **Гидродинамика течений учитывалась дополнительным трением о внутреннюю поверхность ледяного покрова.** Для касательных напряжений на свободной поверхности принималась квадратичная зависимость от средней по глубине скорости течения с коэффициентами шероховатости по Маннингу  $n$ . При этом влияние ветра не учитывалось, поскольку свободная поверхность воды экранировалась льдом. Вопрос о профиле скорости по вертикали в подледном течении не рассматривался, так как для определения уровней воды при заторных наводнениях он не существен.
- **Натурные измерения реальных течений показали,** что дополнительные коэффициенты шероховатости от наличия льда на поверхности потока имеют значения от 0.02–0.03 для среднестатистического зимнего периода до 0.03–0.06 и более при наличии затора льда в период половодья (Беликов В.В. и др., 2004, Фролова Н.Л. и др., 2013). В расчетах суммарный коэффициент шероховатости для участка с ледовым затором принимался равным 0.05.
- **Построена цифровая модель рельефа (ЦМР)** участка русла реки Волги выше и ниже створа мостового перехода (рисунок). Расчеты уровней воды и скоростей течения в условиях сформировавшегося по всей ширине русла ледового затора при толщине льда, равной 0,73 м (обеспеченностью 10% и полученной по данным натурных измерений в начале марта 2021 г.), выполнены в программном комплексе STREAM 2D CUDA (Алексюк А.И., Беликов В.В., 2017).
- В расчетах ледовый затор располагался выше створа мостового перехода по всей ширине реки на расстоянии 6 км вверх по течению. По данным гидрологических изысканий при расходах воды 29800 м<sup>3</sup>/с и 30200 м<sup>3</sup>/с уровни воды в створе моста были равны 54.16 м и 54.34 м (в период ледохода) соответственно. При этом уклон водной поверхности на участке выше моста без льда равен 3 см/км ( $I=0.00003$ ), а с учетом устойчивого льда (затора выше моста) - 6.7 см/км ( $I=0.000067$ ), т.е. возрастает более чем в 2 раза. Глубина потока по линии основного фарватера при таких уровнях достигает 18-19 м, а в мелководной зоне 5-6 м (рисунок).



## Результаты и обсуждение. Моделирование речного потока в районе моста в условиях формирования затора льда

22

- Расчеты с учетом ледовых явлений для условий весны 2021 года показали, что существовавшие к этому моменту временные сооружения практически не оказывают влияние на гидродинамические характеристики потока и сам ледоход не может оказывать на них сильного негативного воздействия.
- Прогнозные расчеты ледовых явлений для условий весны 2022 года, когда временный мост будет функционировать в полном объеме, может привести к протяженному ледовому затору (длиной до 10 км). Однако предусмотренные для временного моста ледорезы, по проведенной оценке, должны справиться с нормативной нагрузкой. При длине затора 7.5 км они должны начать разрезать льдины.
- Ледовая нагрузка на опоры постоянного моста в период сохранения временного моста может достигать 60 Тс на опору за счет воздействия ледового затора, кроме того, возможно ударное воздействие от плывущих одиночных льдин, наиболее сильное в глубоководной части на фарватере, где скорости достигают 2 м/с.



Сопоставление уровней воды рассчитанных при  $Q=30000 \text{ м}^3/\text{с}$  (а - без льда, б – с льдом) с уровнем воды на выходной границе 54 м (штриховая линия – граница льда, сплошная линия – створ мостового перехода)



- В условиях изменения климата и ледового режима водных объектов в результате хозяйственной деятельности человека, трансформируются методы прогноза ледовых явлений, которые в основном базируются на статистических зависимостях, установленных по данным гидрометеорологических наблюдений.
- Результаты непрерывного мониторинга ледового и гидрологического режимов важны для своевременного прогноза, принятия предотвращающих мер и оценки последствий влияния опасных ледовых явлений на водные объекты.
- Выполнена кластеризация территории России по генезису ледовых явлений и типам опасных гидрологических явлений с зафиксированным материальным ущербом, полученная с использованием метода кластерного анализа. Обеспечивая противодействие техногенным и природным угрозам на водных объектах, разработанный информационный ресурс может быть использован при определении региональных перечней и критериев опасных ледовых гидрологических явлений, сборе сведений об угрозе, возможных последствиях и мониторинге таких явлений. Результаты качественного и количественного анализа могут применяться при сборе сведений о последствиях воздействия и мониторинге опасных ледовых явлений, также для предоставления органам государственной власти и другим организациям фактических прогностических данных об опасных гидрологических явлениях в целом по стране и на территории субъектов федерации. Кроме того, результаты исследования могут быть использованы при обосновании режимов функционирования водохранилищ гидроузлов (каскадов гидроузлов) и разработке правил использования водных ресурсов.
- Современные тенденции в развитии математического моделирования процессов заторо-зажорообразования, транспортирующей способности подледных потоков на участках рек с инженерными сооружениями связаны с сочетанием гидродинамических моделей, моделей формирования речного стока функционирования водохозяйственных систем.

**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ !!!**