

# МЕТОДЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОЛОГИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УГРОЗ, СВЯЗАННЫХ С ОПАСНЫМИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНИЯМИ

## COMPUTATIONAL HYDROLOGY METHODS FOR REDUCING THREATS ASSOCIATED WITH DANGEROUS HYDROLOGICAL PHENOMENA

Круглый стол, посвященной памяти проф. В.А. Духовного  
«Повышение эффективности региональной координации в сфере водных ресурсов и  
энергетики в Центральной Азии»  
16 августа 2023 г., г. Ташкент, Республика Узбекистан

**Дмитрий Козлов**  
**Dmitry Kozlov**  
заведующий кафедрой ГиГС НИУ МГСУ



- **Водная безопасность** - важнейший вызов современности. Для национальной безопасности России водный фактор связан с такими источниками рисков как аварии на гидротехнических сооружениях и наводнения, вызванные опасными гидрологическими явлениями (ОГЯ).
- **В России ущерб от всех возможных** гидрометеорологических явлений составляет 80–90% от общего ущерба природного характера. Наводнения, вызванные половодьем, паводками, зажорными и заторными явлениями, входят в «тройку лидеров» ОГЯ, оказывающих «поражающее воздействие на людей, отрасли экономики и окружающую природную среду».

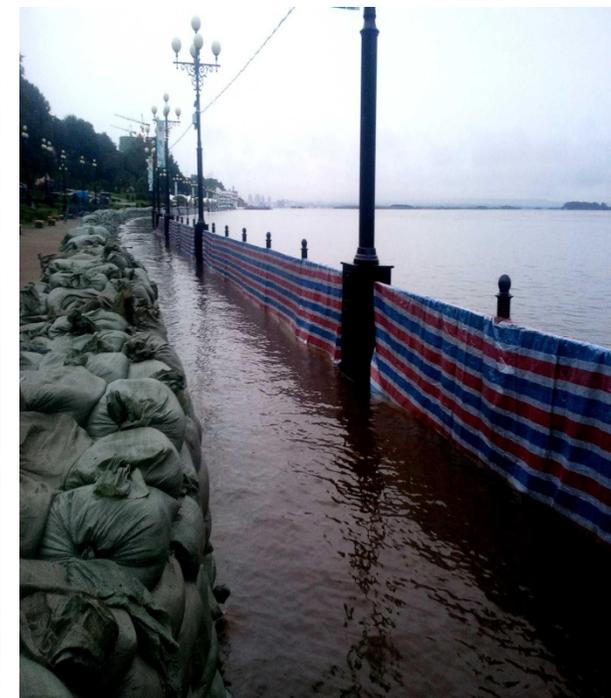
### Relevance of the topic

- **Water safety** is the most important challenge of our time. For the national safety of Russia, the water factor is associated, first of all, with such sources of risks as accidents at hydraulic structures and floods caused by dangerous hydrological phenomenon.
- **In Russia**, the damage from all possible hydrometeorological phenomena is 80-90% of the total damage of a natural environment. Floods caused by high water, ice jam or ice hanging dam are among the "three leaders", which have a "damaging effect on people, economic sectors and the environment"



- В 2020 году Росгидромет зафиксировал в России 1000 опасных гидрометеорологических явлений (на 97 явлений больше, чем в 2019 году), из которых 372 явления нанесли значительный ущерб объектам жизнедеятельности.
- 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.

- In 2020, The Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring recorded **1,000 dangerous hydrometeorological phenomena in Russia** (97 phenomena more than in 2019), of which 372 phenomena caused significant damage to objects of vital activity
- **Over the past 25 years, more than 130 ice-clogging floods** with recorded material damage have been registered in Russia. **The scale of damage varies:** from the maximum in the spring of 2001 on the Lena River to the insignificant - in sparsely populated river basins of the Far North.



## Технологический комплекс инженерной гидрологии (**The technological complex of engineering hydrology**):

- ❑ **мониторинг** поверхностных и подземных вод, включая наблюдения (систему сбора и передачи информации) и измерения физико-географических характеристик (monitoring of surface and groundwater, including the observations and the measurements of physical and geographical characteristics);
- ❑ **технологии** управления водными ресурсами (water resources management technologies);
- ❑ **статистический анализ** гидрологических данных (statistical analysis of hydrological data);
- ❑ **моделирование** гидрологических (в том числе гидравлических) систем (modeling of hydrological (and hydraulic) systems);
- ❑ гидрологические **прогнозы** (hydrological forecasts)

Фото "Томскгеомониторинг« (2010-2011 гг.)



- 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) - **The search for statistically significant trends** in the historical timing of the ice formation and the ice break-up (based on a statistical analysis of the characteristics of the ice regime of the mouth section of the Northern Dvina River in the retrospective period);
- 2. **Классификация субъектов России по спектру опасных гидрологических (в т.ч. ледовых) явлений** с зафиксированным материальным ущербом, статистическая оценка многолетней динамики этих явлений и заблаговременности их прогнозов в каждом из регионов - **The classification of the subjects of the Russia by the spectrum of hazardous hydrological and ice phenomena** with recorded material damage, statistical assessment of the long-term dynamics of these phenomena and the advance nature of their forecasts in each of the regions;
- 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) - **The qualitative and quantitative assessment** of the factors that influenced the occurrence of ice jam and the development of winter flooding in the regulated section of the river (based on the results of monitoring the hydrometeorological and hydrological situation in the Volga River basin below the Rybinsk hydroelectric complex);
- 4. **Математическое моделирование речного потока** в районе мостового перехода, в том числе в условиях формирования затора льда (на участке реки Волги для оценки скоростей течения и уклонов водной поверхности) - **The mathematical modeling of the river flow** in the area of the bridge crossing in the conditions of ice jam formation (on a section of the Volga River to assess the flow velocities and slopes of the water surface) followed by an assessment of ice impacts on the temporary transport structure.

## 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

## **Methodology**

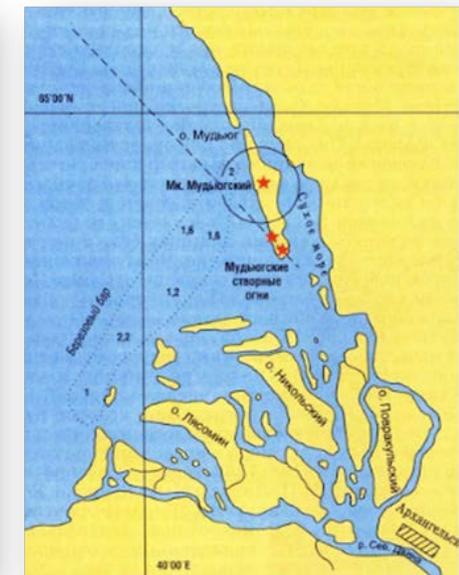
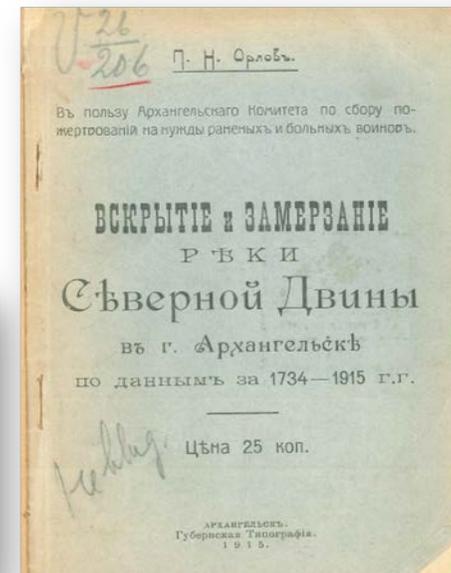
The solution of the tasks was established on the methodological approaches based on the fundamental provisions of engineering hydrology and methods of scientific and cognitive activity: empirical (passive experiment) and universal general logical methods (analysis, synthesis, generalization, etc.), as well as methods of mathematical modeling of hydrological and hydraulic processes, mathematical statistics, multidimensional analysis and expert assessments

**Как снизить угрозу водной безопасности?**

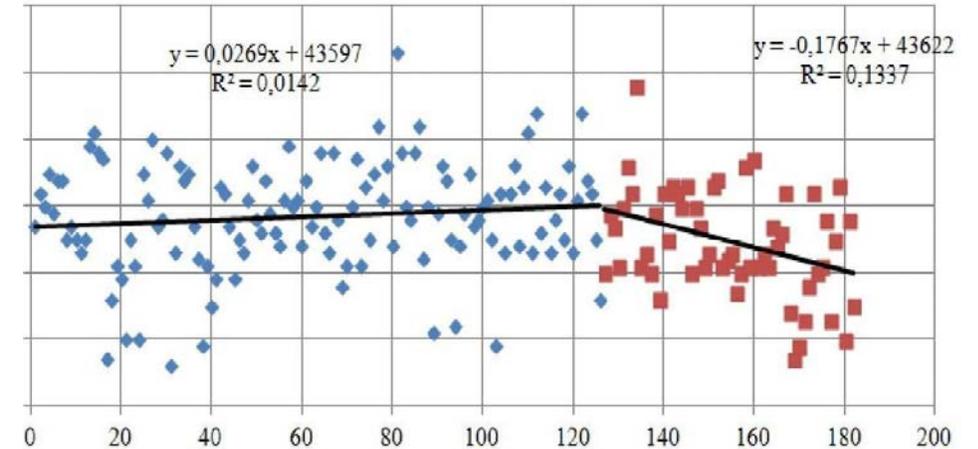


- **Ледовый режим рек России**, как часть гидрологического режима реки, подвергся в XX-XXI веках существенному изменению, в том числе из-за интенсивного антропогенеза и климатических изменений. Для того чтобы оценить последние современные изменения ледового режима, необходимо провести ретрансформацию 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.

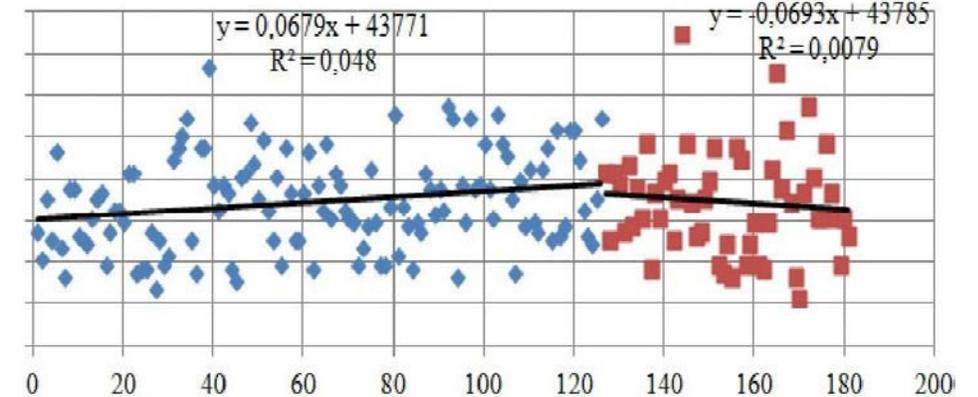
- Для статистически достоверных выводов о возможной нестационарности ледовых явлений на реке за ретроспективный период наблюдений продолжительностью более 180 лет (1734-1915) ряды на Северной Двине были протестированы на гидрологическую однородность изучаемых характеристик в соответствии с рекомендациями Государственного гидрологического института. **Методическая основа** - многомерный анализ данных и методы математической статистики - **For statistically reliable conclusions** about the possible non-stationarity of ice phenomena on the river over a retrospective observation period of more than 180 years (1734–1915), the Northern Dvina was tested for the hydrological homogeneity of the studied characteristics in accordance with the current methodological guidelines of the State Hydrological Institute



- **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.
- **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** - Analysis of retrospective data for 182 years (from 1734 to 1915) made it possible to exclude the influence of anthropogenic factors on the assessment of the variability of the ice regime on the mouth section of the Northern Dvina River. **The identified trends have indicated a possible warming of the climate in the northern latitudes.**



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



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

- Особенности распределения ОГЯ, в том числе и ледового генезиса, на территории России зависят в первую очередь от природно-климатических условий и характеристик антропогенной деятельности - **The features of the distribution of DHP**, including ice genesis, on the territory of Russia depend primarily on the natural and climatic conditions and characteristics of anthropogenic activity.
- 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 Росгидромета, 2020) - **The starting material for studies of the long-term dynamics of dangerous hydrological and ice phenomena** was Roshydromet data on adverse weather conditions and dangerous hydrometeorological phenomena that caused socio-economic losses in Russia for a 29-year period from 1991 to 2019.
- Общий массив данных об ОГЯ включал почти 1900 событий - **The total data set of DHP has included almost 1900 events.**



- 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 - **The classification of the subjects of Russia by type, number and frequency of occurrence of ice DHP** in the development of work of [1] was carried out using the method of multidimensional data analysis - cluster analysis. The regression analysis methods were used to verify the stationarity of long-term DHP series by cluster, region, and type



- На территории РФ из 100% событий ОГЯ чаще всего материальный ущерб приносили **паводки** (33,3%) и **половодья** (29,8%), 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 6 (затор и зазор, низкая межень, паводок и половодье, сель).

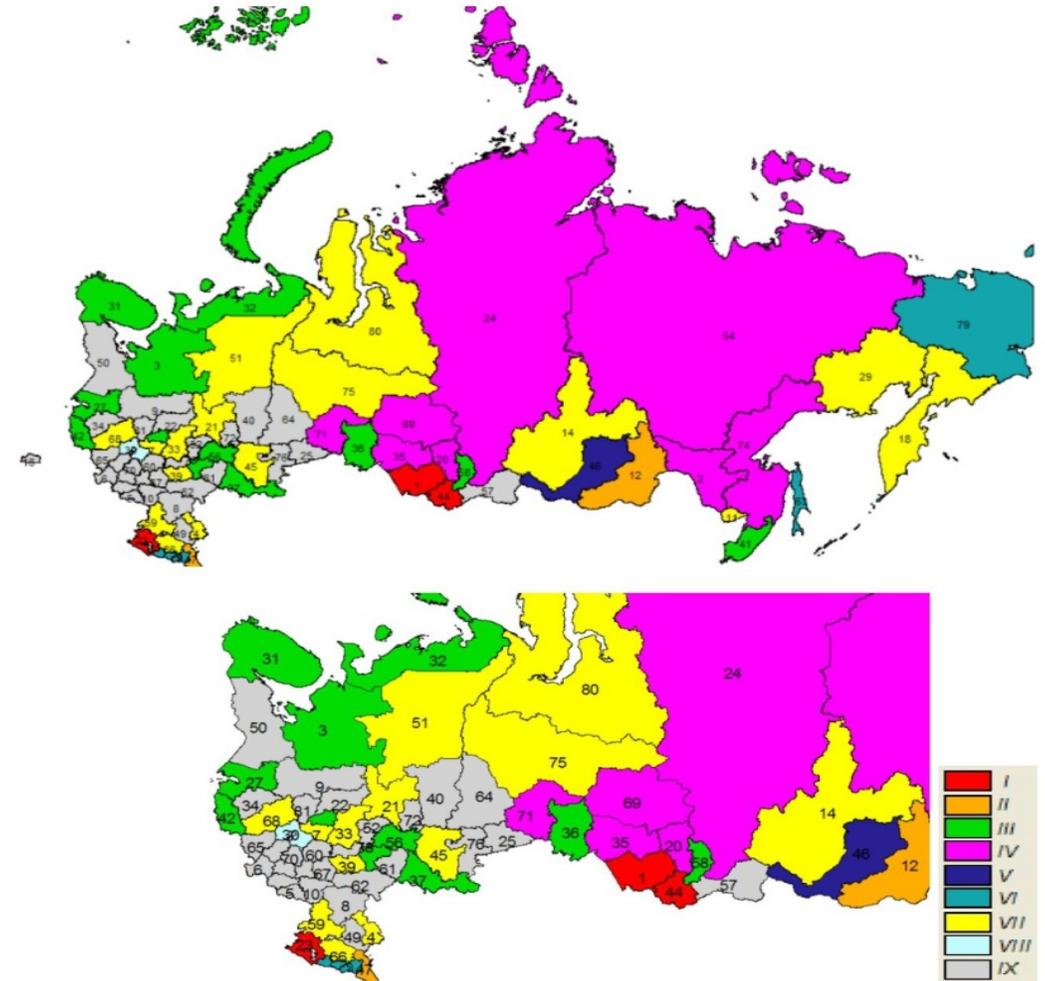
- По каждому виду ОГЯ в пределах территории России были построены линейные тренды.** Результаты оценки значимости трендов по всем видам ОГЯ, в том числе ледовым заторам, приведены в таблице. **За период 1991-2019 гг. все анализируемые ОГЯ с зафиксированным материальным ущербом имели тенденции к росту,** но тренды были признаны статистически незначимыми как на 5%, так и на 1% уровнях значимости.

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

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

- Floods** (33.3%) and **high waters** (29.8%) caused the most material damage on the territory of Russia out of 100% of the events of the DHP, and cases of recorded damage from **ice jams and ice hanging dams** amounted to 7.2% and 0.5%, respectively. Descriptive data statistics showed that the maximum number of DHP types found in a particular region (in 2% of the subjects of the Russia) can reach up to six (ice jam and ice hanging dam, low baseflow, high water and flood, mudflow).
- The results of assessing the significance of trends for all types of DHP, including ice jams, shown in Table.** For the period 1991-2019, all DHP analyzed with recorded material damage had upward trends, but trends were recognized as statistically insignificant at both 5% and 1% significance levels.
- Using cluster analysis, **the DHP were grouped into 4 typical groups:** ice difficulties (ice jam, ice hanging dam, early ice formation), high waters and floods, mudflows, low base flow. The combination of these phenomena is special for each subject of the Russian Federation. Each of the 85 subjects of Russia was assigned to one of nine clusters, depending on the combination of DHP types, which in different years caused material damage to the region

- Используя кластерный анализ, **ОГЯ были объединены в 4 типичные группы:** ледовые затруднения (зажоры, заторы, раннее ледообразование), высокие воды (половодья и паводки), сели, низкая межень. 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.
- **Перечень кластеров, в комбинации типов ОГЯ которых входят ледовые затруднения, 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 РФ)



**номера кластеров:** I – ледовые затруднения, высокие воды, сели, низкая межень; II – ледовые затруднения, высокие воды, сели; III – ледовые затруднения, высокие воды; IV – ледовые затруднения, высокие воды, низкая межень; V – высокие воды, сели, низкая межень; VI – высокие воды, сели; VII – высокие воды, низкая межень; VIII – низкая межень; IX – высокие воды

% -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

- В регионах, на территории которых зафиксировано два или более типа ОГЯ, иногда значительно отличается частота их возникновения. За период 1991-2019 гг. одни субъекты федерации могли в большей степени нести материальные потери от высоких вод, другие - от ледовых затруднений и т.д. Поэтому **внутри кластеров № 1,2,3,4 выполнена 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

- **Внутри каждого кластера в зависимости от доли ОГЯ каждого типа субъекты РФ были разбиты на группы. Кластер №3** объединяет регионы, для которых материальный ущерб наносят такие типы ОГЯ, как ледовые затруднения и высокие воды. В Омской, Пензенской и Ульяновской области, Приморском крае в среднем только 10% из всех случаев зафиксированного материального ущерба вызывали ледовые затруднения, остальные 90% случаев приходились на паводки и половодья. В **кластере №4**, объединяющем другие субъекты федерации, материальный ущерб наносят такие типы ОГЯ, как ледовые затруднения, высокие воды и низкая межень. 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 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.
- **Проведено районирование территории России по преобладающим видам ОГЯ** (в т.ч. ледовых) и оценена степень подверженности субъектов федерации их воздействию. Информация позволяет оценить территориальные риски, обусловленные ОГЯ, и своевременно выявить негативные процессы, возможное проявление которых может повлиять на возникновение ЧС на водных объектах и прилегающих территориях



- The use of cluster analysis methods made it possible to zoning the territory of Russia according to **the predominant types of DHP** and to assess the degree of exposure of the subjects of the Russia to their impact. The information obtained makes it possible to assess the territorial risks caused by DHP and to timely identify negative processes. The possible manifestation of that may affect the occurrence and development of emergency situations in water bodies and adjacent territories; floods, freshets and ice difficulties cause material damage in a significant part of the subjects of the Russia

- **Формирование катастрофических наводнений на реках может быть обусловлено ледовыми явлениями.**
- Развитие зажорных явлений при образовании ледяного покрова и заторных явлений при его разрушении обусловлено наличием переломов продольного профиля реки, повышенных уклонов и скоростей течения на речном участке в сочетании с колебаниями режима попусков на ГЭС.
- Условия образования заторов на зарегулированном участке реки отличаются от бытовых условий заторообразования наличием предпаводочной сработки уровня воды.
- **Главный фактор заторообразования** - недостаточная льдо- и водопропускная способность русла, связанная с его морфологическими особенностями.
- **Оценка факторов**, повлиявших на возникновение ледового затора и развитие зимнего наводнения на р. Волге ниже Рыбинского гидроузла (г. Ярославль) в феврале 2020 г. в сравнении с затороопасной ситуацией (зимой 2007 г.), была выполнена на основании результатов мониторинговых наблюдений (по оперативным сводкам МЧС России, ПАО «РусГидро», Росгидромета, Росводресурсов).
- **Фактор недостаточной пропускной способности русла** является постоянным, но в ситуации с случаем 2020 года на речном участке Нижегородского водохранилища р. Волги в Ярославской области сыграл решающую роль в формировании ледового затора

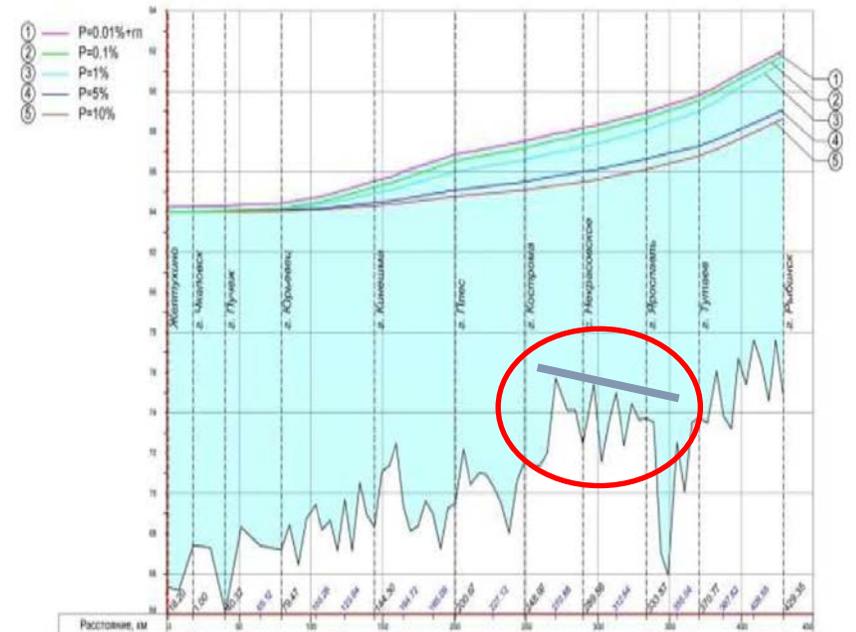


**The factor of insufficient throughput of the channel** is relatively constant, but in the situation with the considered case (2020) on the river section of the Nizhny Novgorod reservoir of the Volga River in the Yaroslavl region played a decisive role in the formation of an ice jam

- **Пассивный эмпирический эксперимент**, использующий систематизированные метеорологические, гидрологические (о расходах и уровнях воды) данные и сведения о ледовых явлениях на реке, применение универсального (общелогического) метода (**анализ и синтез, обобщение**) позволили **определить особенности процессов заторообразования** на зарегулированных участках рек, оценить гидрологическую ситуацию и ледовую обстановку с анализом причин и последствий заторообразования на речном участке Горьковского водохранилища ниже Рыбинского гидроузла.
- **Проект Правил использования водных ресурсов** Рыбинского и Горьковского водохранилищ на р. Волге
- The generalization of the features of ice jam processes in overregulated sections of rivers, as well as assessment of the hydrological situation and ice conditions with an analysis of the causes and consequences of ice jams on the river section of the Gorky reservoir below the Rybinsk hydroelectric complex were carried out as a result of a **passive empirical experiment** using meteorological, hydrological (on water flows and levels) data and information on ice phenomena on the river, as well as the use of a universal (logical) **method - analysis and synthesis, induction and deduction, generalization.**
- **The draft Rules for the Use of Water Resources** of the Rybinsk and Gorky Reservoirs on the Volga River were useful to provide the study.



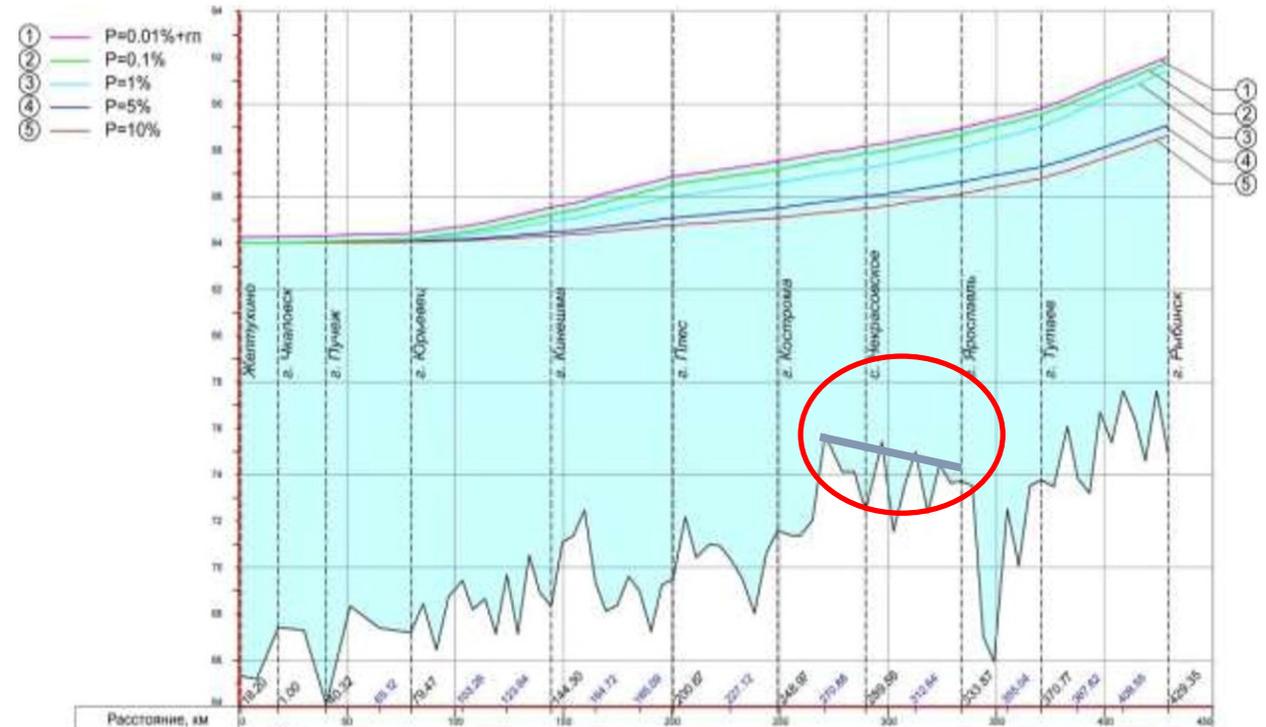
- На продольном профиле (рисунок) Нижегородского водохранилища виден 50-километровый «порожистый» с обратным уклоном дна участок русла в районе поселка Некрасовское на участке реки от Ярославля до Костромы, на котором расположены крупные морфометрические преграды: несколько островов, сужений и поворотов русла.
- 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 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 не превысило 30-40%.
- Время образования ледовых заторов как в феврале 2020 г., так и в январе 2007 г., совпало с периодами значительных колебаний сбросных расходов на Рыбинском гидроузле при общем их существенном росте.
- Сработка воды у плотины гидроузла Нижегородского водохранилища более чем на 0,3-0,35 м за счет соответствующего увеличения сбросных расходов на Нижегородском гидроузле.



Расчетные кривые свободной поверхности Нижегородского водохранилища на затороопасном участке реки Волга; 1, 2, 3, 4, 5 - уровни воды (м) для лет разной обеспеченности

**Calculated curves of the free surface of the Nizhny Novgorod Reservoir on a congestion-prone section of the Volga River 1, 2, 3, 4, 5 - water levels (m) for years of different SAFETY**

- **Негативное влияние** предполоводной сработки уровня воды в водохранилище на условия и возможность образования ледовых заторов на зарегулированном участке реки выше гидроузла.
- **Величина максимального подъема заторных уровней** в Волге в районе Ярославля в 2020 г. на 1 м превысила максимум 2007 г. при даже несколько меньших колебаниях сбросов из Рыбинского водохранилища.
- **Основное отличие** - «пониженный фон» уровней воды в верхнем бьефе у плотины Нижегородского гидроузла (в 2020 г. в январе-феврале они были на 0,8 м ниже, чем в 2007 г.).
- При установлении режимов работы водохранилищ следует учитывать водохозяйственную и гидрометеорологическую обстановку с учетом анализа наблюдений за опасными гидрологическими явлениями.
- **Результаты были использованы при обосновании режимов** функционирования водохранилищ Волжско-Камского каскада гидроузлов и разработке новой редакции правил использования водных ресурсов водохранилища.

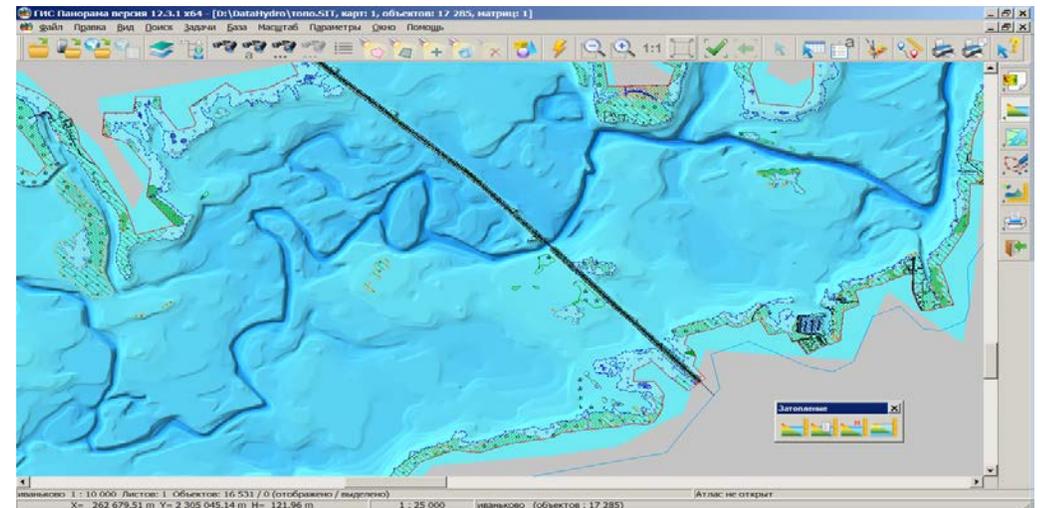


**Расчетные кривые свободной поверхности Нижегородского водохранилища на затороопасном участке реки Волга**

The magnitude of the maximum rise in ice dam levels in the Volga River near Yaroslavl in 2020 exceeded the maximum of 2007 by almost 1 m with even slightly smaller fluctuations in discharges from the Rybinsk reservoir. Therefore, when establishing the operating modes of reservoirs, special account should be taken of the emerging water management and hydro meteorological situation, taking into account the analysis of observations of hazardous hydrological phenomena on the water body

- 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 попусков 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.

- 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** (Беликов В.В., 2017), основанного на численном решении уравнений мелкой воды в двумерной (плановой) постановке и простейшей модели, не учитывающей упругие свойства льда.
- The assessment of ice impacts on the capacity of the Volga River bed and the temporary bridge crossing during the construction period was carried out by the method of mathematical modeling of the river flow in the area of the bridge crossing in the conditions of ice jam **using the Russian software package - STREAM 2D CUDA**, based on the numerical solution of the equations of shallow water in a two-dimensional (planned) formulation and the simplest model (with no consideration of the elastic properties of ice)



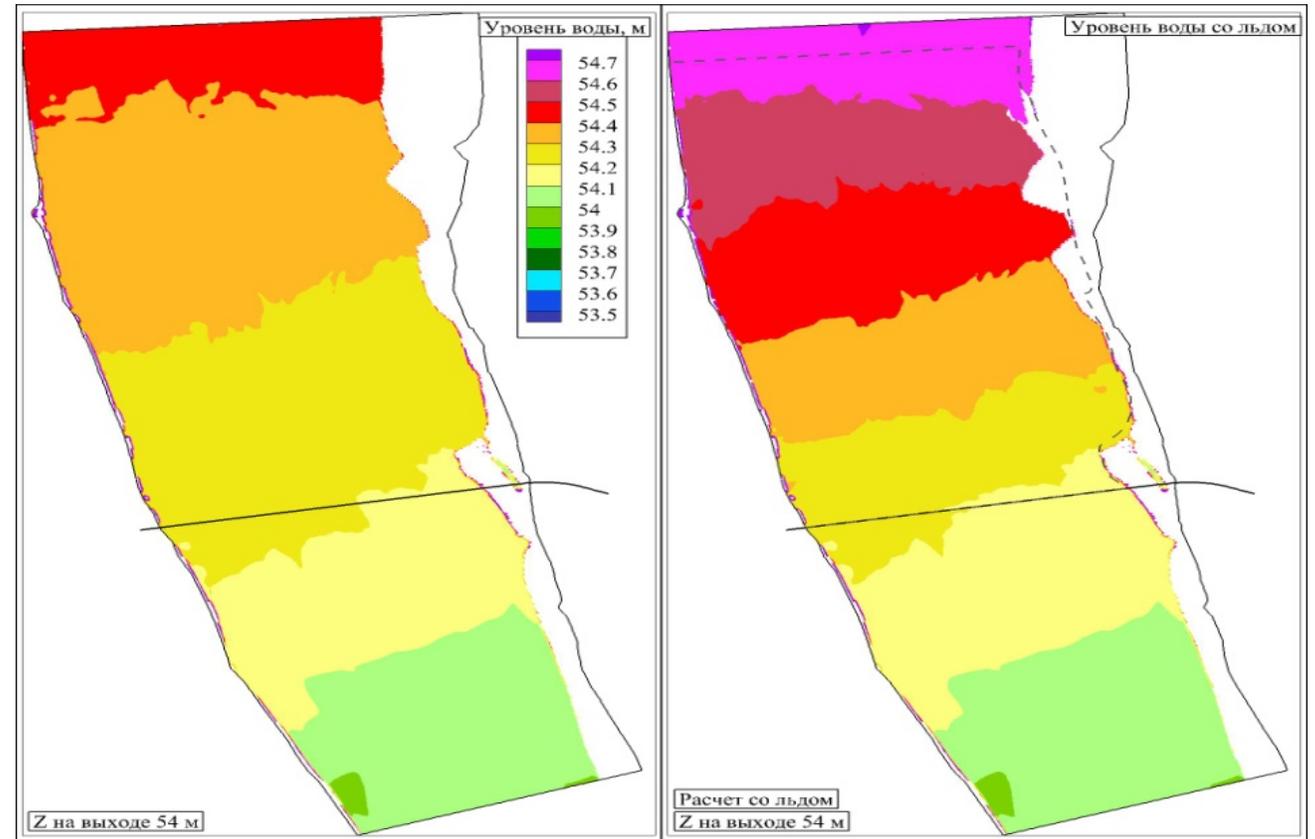
- Гидродинамика течений учитывалась дополнительным трением о внутреннюю поверхность ледяного покрова. Для касательных напряжений на свободной поверхности принималась квадратичная зависимость от средней по глубине скорости течения с коэффициентами шероховатости по Маннингу  $n$ . При этом влияние ветра не учитывалось, поскольку свободная поверхность воды экранировалась льдом. Вопрос о профиле скорости по вертикали в подледном течении не рассматривался.
- **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. 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. 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.
- В расчетах ледовый затор располагался выше створа моста 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

The hydrodynamics of the streams was taken into account by additional friction on the inner surface of the ice cover.

**A digital elevation model (DEM)** of the Volga River bed above and below the gate of the bridge crossing was constructed .

**In the calculations**, the ice jam was located above the gate of the bridge crossing the entire width of the river at a distance of 6 km upstream. According to hydrological surveys, at water flows of 29800 m<sup>3</sup> / s and 30200 m<sup>3</sup> / s, the water levels in the gate of the bridge crossing were equal to 54.16 m and 54.34 m (during the ice age), respectively

- Расчеты с учетом ледовых явлений для условий весны 2021 г. 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



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)

**Comparison of water levels calculated** at  $Q=30000 \text{ м}^3/\text{с}$  (a - without ice, b - with ice) with the water level at the output boundary of 54 m (dash line - ice boundary, solid line - gate of the bridge crossing)

- **Методы прогноза ледовых явлений трансформируются и 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 явлений.
  - **Выполнена кластеризация территории России по генезису ледовых явлений и типам ОГЯ.** Разработанный информационный ресурс может быть использован при определении региональных перечней и критериев ОГЯ, сборе сведений об угрозе, возможных последствиях и мониторинге таких явлений. Результаты могут применяться при сборе сведений о последствиях воздействия и мониторинге опасных явлений, а также для предоставления органам государственной власти и другим организациям фактических и прогностических данных об ОГЯ в целом по стране и на территории субъектов федерации. Результаты исследования могут быть использованы при обосновании режимов функционирования водохранилищ гидроузлов и разработке правил использования водных ресурсов.
  - **Тенденции в развитии математического моделирования процессов заторо- и зажорообразования,** транспортирующей способности подледных потоков на участках рек с инженерными сооружениями связаны с сочетанием гидродинамических моделей, моделей формирования речного стока и функционирования ВХС
- In the context of climate change and the ice regime of water bodies as a result of human economic activity, the methods of forecasting ice phenomena are being transformed, which are mainly based on statistical dependencies established according to hydro meteorological observations.
  - **The results of continuous monitoring of ice and hydrological regimes** are important for timely forecasting, taking preventive measures and assessing the consequences of the impact of ice hazards on water bodies.
  - **Clustering of the territory of Russia by the genesis of ice phenomena and types of dangerous hydrological processes** with recorded material damage, obtained using the cluster analysis method, was carried out. Ensuring counteraction to technogenic and natural threats on water bodies, the developed information resource can be used in determining regional lists and criteria for dangerous ice hydrological phenomena, collecting information about the threat, possible consequences and monitoring of such processes.
  - **Modern trends in the development of mathematical modeling** of the processes of ice jam formation, transporting ability of sub glacial flows in sections of rivers with engineering structures are associated with a combination of hydrodynamic models, models of river flow formation and the functioning of water management systems.

***СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ !!!  
THANKS FOR YOUR ATTENTION!!!***