

УДК 627.8.04

## **Опасные гидрологические явления Красноярского края и заблаговременность их прогноза**

### **Dangerous hydrological phenomena of the Krasnoyarsk Territory and the lead time of their forecast**

<sup>1</sup>Снежко Вера Леонидовна, <sup>2</sup>Короткоручко Дмитрий Юрьевич,  
<sup>3</sup>Кондратьева Ольга Владимировна

<sup>1,2,3</sup>Российский государственный аграрный университет, Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева

Ключевые слова: гидрология, опасные природные явления, риски, прогноз, материальный ущерб

Keywords: hydrology, natural hazards, risks, forecast, material damage

#### **Аннотация.**

В России наблюдаются существенные колебания климатических условий по территории страны, ущерб от гидрометеорологических явлений составляет 80–90 % от общего ущерба природного характера. Для территории Красноярского края характерно пять видов опасных гидрологических явлений, приводящих к возникновению материального ущерба: заторы, зажоры, низкая межень, половодья и паводки. Материалом исследований стали многолетние данные фиксации опасных гидрологических явлений с зафиксированным материальным ущербом за 30 лет. Выполнен анализ опасных гидрологических явлений, проверена стационарность временных рядов и сделаны выводы о статистической значимости полученных трендов. Проанализированы сведения о выпущенных прогнозах по каждому гидрологическому явлению, систематизированы сведения об их заблаговременности. Данные исследований могут использоваться учреждениями и организациями, уполномоченными по проведению мониторинга окружающей среды, при

определении региональных перечней и критериев опасных природных явлений.

In Russia, there are significant fluctuations in climatic conditions throughout the country, the damage from hydrometeorological phenomena is 80–90% of the total damage of a natural nature. For the territory of the Krasnoyarsk Territory, five types of dangerous hydrological phenomena are characteristic, leading to the occurrence of material damage: traffic jams, ice jams, low low water, floods and floods. The research material was long-term data on fixing dangerous hydrological phenomena with fixed material damage for 30 years. The analysis of dangerous hydrological phenomena was carried out, the stationarity of the time series was checked, and conclusions were drawn about the statistical significance of the obtained trends. Information about the issued forecasts for each hydrological phenomenon is analyzed, information about their lead time is systematized. Research data can be used by institutions and organizations authorized to conduct environmental monitoring in determining regional lists and criteria for hazardous natural phenomena.

### **Введение**

Типовой перечень опасных природных явлений учитывает рекомендации Всемирной метеорологической организации и включает пять групп опасных природных явлений: метеорологические, агрометеорологические, гидрологические, морские гидрометеорологические, гелиогеофизические. В речных бассейнах может наблюдаться девять видов опасных гидрологических явлений: заторы, зажоры, половодья, паводки, очень большие расходы воды (повторяемостью менее 10%), очень малые расходы воды (повторяемостью менее 10%), сели, низкая межень, раннее ледообразование на судоходных реках, озерах и водохранилищах. Размер ущерба зависит от географического расположения, особенностей водосбора и степени освоенности пойменных территорий.

Опасные гидрологические явления встречаются в подавляющем большинстве стран мира. Например, наводнения, повлекшие за собой материальные потери, отмечались на территории Германии [1, 2], центральной Испании [3]. Наводнения и низкая межень наносят значительный ущерб на территории США [4]. В России, где наблюдаются существенные колебания климатических условий по территории страны, ущерб от гидрометеорологических явлений составляет 80–90 % от общего ущерба природного характера. При этом наибольшие материальные потери вызывают очень сильные ветры (в том числе ураганы, шквалы и смерчи), атмосферные и почвенные засухи и наводнения, вызванные половодьем, паводками и зажорно-заторными явлениями.

Затор льда, как гидрологическое явление, представляет скопление ледяного материала (главным образом поверхностного льда) в русле реки. Затор образуется во время ледохода, стесняет живое сечение и вызывает тем самым подъем уровня воды, что приводит к весьма значительным затоплениям прилегающей местности. Под зажором понимается скопление шуги в русле реки, вызывающее забивку части живого сечения и повышение уровня воды. Наиболее мощные заторы образуются в период весеннего ледохода; зажоры имеют место в предледоставный период, а также в течение зимы при наличии незамерзающих участков русла [5]. Поражающими факторами указанных опасных гидрологических явлений являются: гидродинамическое и гидростатическое воздействие (давление) воды, статическое и динамическое (ударное, истирающее и др.) давление льда, воздействие взвешенных и влекомых наносов, динамическое воздействие движущейся селевой массы (состоящей из горных пород, воды и снега) и т.д.

В зависимости от географического положения региона страны, плотности населения, степени освоенности пойменных территорий и особенностей водосбора опасные гидрологические явления, сопровождающиеся зафиксированным материальным ущербом, имеют в каждом из субъектов Российской Федерации свою специфику и различную

повторяемость. Различные аспекты воздействия опасных гидрологических явлений на природно-технические системы, оценки опасности наводнений на территории Российской Федерации и в ее субъектах рассматриваются, например, в работах [6, 7]. Мониторинг опасных явлений регламентируется стандартами [8], для их прогноза часто применяются преимущественно прикладные математические методы [9]. Территория Красноярского края характеризуется сложными физико-географическими и климатическими условиями, при которых создаются предпосылки для возникновения опасных и неблагоприятных гидрологических явлений, которые оказывают негативное влияние на жизнедеятельность населения, на развитие отдельных отраслей экономики края. К примеру, паводок в июне 2021 года привел к затоплению пониженных участков на берегах Енисея в г. Красноярск, и на Саяно-Шушенской ГЭС впервые с 2010 года были сбросы воды. В мае 2014 года из-за заторного подъема воды на р. Тея в поселке с одноименным названием произошло подтопление 15 жилых домов, в которых вода над уровнем пола поднялась на 0,5..0,5 метров.

**Цель исследований:** выявить динамику и структуру рядов многолетних наблюдений за опасными гидрологическими явлениями с зафиксированным материальным ущербом, проверить статистическую однородность временных рядов и проанализировать заблаговременность их прогнозов.

#### **Материал и методы.**

Площадь Красноярского края составляет 2366,8 тыс. кв. км (или 13, 86% территории России). Это один из наиболее богатых водными ресурсами регионов. На территории Красноярского края протекает 18733 рек. Из них: 17025 - реки Енисейского бассейнового округа, 525 – реки Верхнеобского бассейнового округа, 1183- реки Ангаро-Байкальского бассейнового округа. Ежегодный сток рек края в северные моря составляет порядка 20% суммарного стока рек, протекающих на территории Российской Федерации. В гидрографическом отношении территория края представляет собой части

водосборных площадей таких крупных рек, как Енисей, Обь, Пяси́на, впадающих в Карское море, и реки Хатанга с притоками, впадающей в Хатангский залив моря Лаптевых. Бассейн Оби представлен верхней частью бассейнов рек Чулым и Кеть [10].

Для территории Красноярского края характерно пять видов опасных гидрологических явлений, при возникновении которых был зафиксирован материальный ущерб: заторы, зажоры, низкая межень, половодья и паводки. Материалом исследований стали официальные сведения о неблагоприятных условиях погоды и опасных гидрометеорологических явлениях, нанесших социальные и экономические потери на территории России за период 1991-2021 гг., предоставленные ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

В исследованиях использовались общенаучные методы – анализ и синтез, а также методы структурного анализа и прикладные математические методы, в частности, регрессионный анализ.

Под временной однородностью гидрологических рядов понимается отсутствие в них статистически значимых трендов. Анализ стационарности ежегодных случаев материального ущерба от опасных гидрологических явлений за 31 год был выполнен по рекомендациям Государственного гидрологического института [11]. Для каждого из многолетних рядов строились линейные тренды вида:

$$y = ax + b, \quad (1)$$

где  $x$  – порядковый номер года в ряду наблюдений;  $a$  и  $b$  – оценки коэффициентов уравнения регрессии;  $y$  – ежегодное количество опасных гидрологических явлений одного вида.

Случайная среднеквадратическая ошибка вычислялась по формуле:

$$\sigma_r = (1 - r^2) / \sqrt{n - 1}, \quad (2)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции;  $n$  – количество лет наблюдений,  $n = 31$ .

При отношении коэффициента корреляции к среднеквадратической ошибке больше или равном 2, тренд признавался значимым на 5% уровне

значимости  $\alpha$ , при отношении больше или равном 3 тренд признавался значимым на 1% уровне значимости  $\alpha$ .

**Результаты и обсуждение.** Оценку экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера затрудняет отсутствие единого подхода к содержанию данного показателя. Единственным законодательным актом, в котором дается понятие ущерба, является Гражданский кодекс РФ. В гражданском праве под ущербом понимается уменьшение имущества, либо недополучение дохода, который мог быть получен при отсутствии правонарушений. За анализируемый период времени 1991-2021 гг. на территории Красноярского края был зафиксирован материальный ущерб от 192 опасных гидрологических явлений (рис.1).

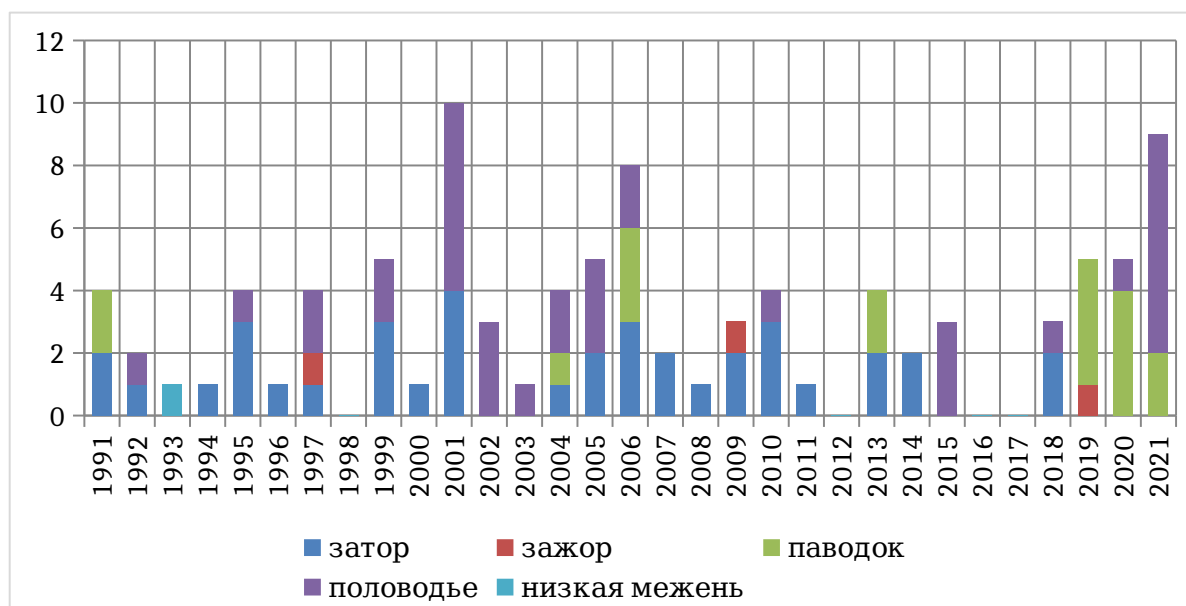


Рис.1 Динамика и структура опасных гидрологических явлений на территории Красноярского края.

Только 4 года из 31 (13%) на территории края опасные гидрологические явления не приносили материальный ущерб. К примеру, в 2001 году произошло 10 опасных явлений, в 2021 гг. - 9, в 2006 году было зафиксировано 8 явлений. В среднем в год на территории Красноярского края фиксируется 3 опасных гидрологических явления, причиняющих

экономический ущерб. Структура опасных гидрологических явлений приведена на рис.2 .

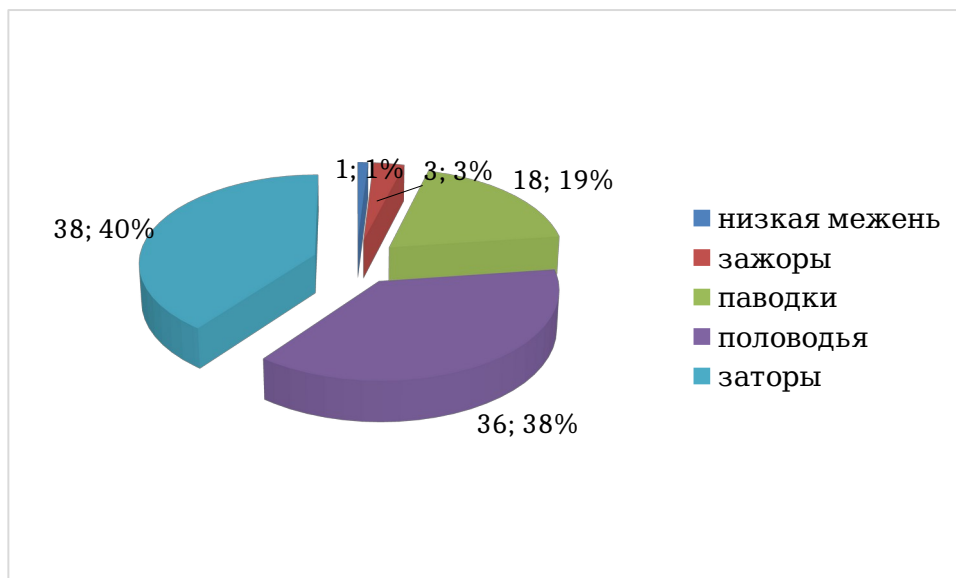


Рис.2 Структура опасных гидрологических явлений с зафиксированным материальным ущербом за 1991-2021 гг.

Наиболее часто на территории Красноярского края материальный ущерб наносят заторы (40% случаев) и половодья (37% случаев), затем следуют паводки (19%). Зажоры льда и низкая межень повлекли за собой материальный ущерб только в 3% и 1% случаев соответственно.

Для выявления статистически значимых трендов роста числа опасных гидрологических явлений по ф. (1) факты объединены в две группы: Ледовые затруднения, Высокие воды/низкие межени. Кроме того, рассмотрен тренд общего числа опасных гидрологических явлений с зафиксированным материальным ущербом. Факторные поля и полученные уравнения парной линейной регрессии приведены на рисунках 3-5.



Рис.2. Линейный тренд общего числа опасных гидрологических явлений с зафиксированным материальным ущербом.



Рис.3. Линейный тренд ледовых затруднений с зафиксированным материальным ущербом.



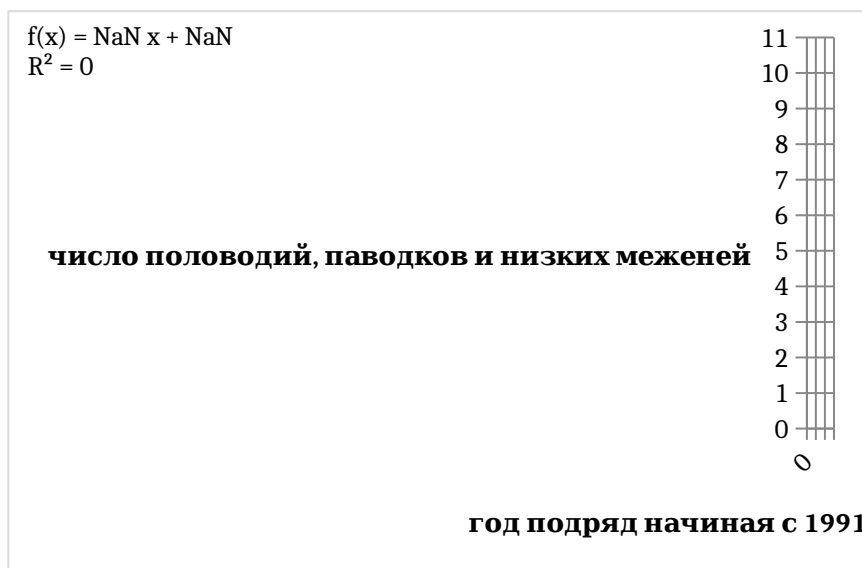


Рис.3. Линейный тренд половодий, паводков и низких меженей с зафиксированным материальным ущербом.

Результаты оценки статистической значимости трендов приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Статистическая значимость трендов опасных гидрологических явлений с материальным ущербом

Таблица 2. Проверка значимости терндов

Вид опасного гидрологического явления	Среднеквадратическая ошибка	Коэффициент корреляции	Отношение ошибки к коэффициенту корреляции	Значимость тренда
Все явления	0,180	0,126	0,708	Не значим
Ледовые затруднения	0,174	0,218	1,254	Не значим
Половодья, паводки и низкая межень	0,268	0,169	1,583	Не значим

Общее число опасных гидрологических явлений, причинивших материальный ущерб на территории Красноярского края, имеет слабо выраженный тренд к росту. Тренд статистически не значим как на уровне 5%, так и на уровне 1%. Число заторов и зажоров с материальным ущербом имеет статистически незначимый тренд к снижению, в то время как число половодий и паводков с зафиксированным материальным ущербом имеет

тренд к росту, который также статистически не значим. Другими словами, за период 1991-2021 гг. можно сделать вывод о временной однородности рядов наблюдений, то есть отсутствии динамики числа опасных гидрологических явления, повлекших за собой зафиксированный материальный ущерб.

Своевременный прогноз опасного гидрологического явления может значительно снизить его негативные последствия [12]. Следующим этапом анализа стали данные по выпуску прогнозов в ретроспективном периоде. Выделяют следующие виды гидрологических прогнозов по срокам их выхода: краткосрочные прогнозы, выпускаемые с заблаговременностью до 15 суток; среднесрочные прогнозы с заблаговременностью от 15 суток до 1 месяца; долгосрочные прогнозы – с заблаговременностью от одного до нескольких месяцев и более. В Таблице 2 приведены сведения о заблаговременности прогнозов каждого вида опасных гидрологических явлений.

Таблица 2. Прогнозы опасных гидрологических явлений с зафиксированным материальным ущербом за 1991-2021 гг.

	Число случаев	Количество прогнозов			
		Долгосрочный	Среднесрочный	Краткосрочный	Заблаговременность неизвестна
Опасное гидрологическое явление	Число случаев	Долгосрочных прогнозов	Среднесрочных прогнозов	Краткосрочных прогнозов	Заблаговременность прогноза неизвестна
Все виды	96	19	3	69	5
Затор	38	8	2	28	
Зажор	3		1	2	
Половодье	36	8	0	27	1
Паводок	18	2	0	12	4
Низкая межень	1	1			
ИТОГО	192	38	6	138	10

Следует отметить, что за период 1991-21 гг. все опасные гидрологические явления были предсказаны заранее, т.е. спрогнозированы.

Прогнозы заторов в большинстве случаев (74%) были краткосрочными со сроком выпуска от 1 до 14 дней. Проблемы заблаговременности выпуска прогнозов заторов и зажоров, которые являются ледовыми затруднениями связана с их многофакторностью. Прогнозы половодий в 75% случаев также были краткосрочными, остальное количество прогнозов было долгосрочным. В прогнозах паводков также преобладали краткосрочные прогнозы (67%), но точность выводов снижается за счет достаточно большого числа прогнозов, заблаговременность которых оказалась неизвестной (22%).

### **Выводы.**

В результате исследований получена типизация опасных гидрологических явлений, характерных для Красноярского края.

Выполнен анализ стационарности рядов наблюдений. Число опасных гидрологических явлений с материальным ущербом остается примерно постоянным и не имеет статистически значимого тренда к росту. Число ледовых затруднений (заторов и зажоров льда) имеет тенденцию к снижению, но тренд статистически не значим. Число половодий и паводков, повлекших за собой материальный ущерб, увеличивается, но рост статистически не значим.

Все опасные гидрологические явления на территории Красноярского края были предсказаны прогнозами, но подавляющее большинство прогнозов (более 70%) было краткосрочными с заблаговременностью от суток до 14 дней.

Данные исследований могут использоваться учреждениями и организациями, уполномоченными по проведению мониторинга окружающей среды, при определении региональных перечней и критериев опасных природных явлений, подготовке информации об угрозе возникновения таких явлений, при сборе сведений о последствиях воздействия и мониторинге опасных явлений на территориях.

**Финансирование.** Программа стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

## Литература

1. Petrow, T. and B. Merz (2009). Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002. *Journal of Hydrology*, 371(1-4), pp. 129–141.
  2. Sui, J. and G. Koehler. (2001). Rain-on-snow induced flood events in Southern Germany. *Journal of Hydrology*, 252(1-4), pp. 205–220.
  3. Benito, G., M. Barriendos, C. Llasat, M. Machado, and V. Thorndycraft. (2005). Impacts on natural hazards of climatic origin. Flood risk. In: *A Preliminary General Assessment of the Impacts in Spain Due to the Effects of Climate Change* [Moreno, J.M. (ed.)]. Ministry of Environment, Spain, pp. 507–527.
  4. Douglas, E.M., R.M. Vogel, and C.N. Kroll. (2000). Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, 240(1-2), pp. 90–105.
  5. Гладкевич, Г.И., Терский, П.Н. и Фролова, Н.Л. (2012). Оценка опасности наводнений на территории Российской Федерации (2012). *Водное хозяйство России*, № 2, с. 29–46.
  6. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: Монография. (2015). М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015, 348 с.
  7. Таратунин, А.А. (2008). Наводнения на территории Российской Федерации. Екатеринбург: Изд-во ФГУП РосНИИВХ, 432 с.
  8. Гагарина Л.Г., Теплова Я.О., Кольцова О.В. Разработка программного обеспечения для проектирования сети постов мониторинга атмосферы // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2009. № 6 (80). С. 58-63.
  9. Кондратьева О.В., Петухова М.В., Щедрина Е.В. Применение нечетких множеств для решения задач прогнозирования и оптимизации // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2022. № 3-3 (66). С. 169-172.
  10. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2018 году» — Красноярск, 2019. 302 с.
  11. Кобозев Д.Д., Снежко В.Л. Оценка влияния потепления климата на элементы гидрологического режима реки Сухона // *Инновации и инвестиции*. 2020. № 11. С. 177-180.
  12. Шаликовский, А.В., Лепихин, А.П., Тиунов, А.А., Курганович, К.А. и Морозов, М.Г. (2019). Наводнения в Иркутской области 2019 года. *Водное хозяйство России*, № 6, сс. 48–65.
- 
1. Petrow, T. and B. Merz (2009). Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002. *Journal of Hydrology*, 371(1-4), pp. 129–141.
  2. Sui, J. and G. Koehler. (2001). Rain-on-snow induced flood events in Southern Germany. *Journal of Hydrology*, 252(1-4), pp. 205–220.
  3. Benito, G., M. Barriendos, C. Llasat, M. Machado, and V. Thorndycraft. (2005). Impacts on natural hazards of climatic origin. Flood risk. In: *A Preliminary General Assessment of the Impacts in Spain Due to the Effects of Climate Change* [Moreno, J.M. (ed.)]. Ministry of Environment, Spain, pp. 507–527.
  4. Douglas, E.M., R.M. Vogel, and C.N. Kroll. (2000). Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, 240(1-2), pp. 90–105.
  5. Gladkevich, G.I., Tersky, P.N. and Frolova, N.L. (2012). Flood risk assessment on the territory of the Russian Federation. *Water management of Russia*, 2, 29–46. (in Russian)
  6. Dangerous ice phenomena on the rivers and reservoirs of Russia: Monograph. (2015). Publishing house of RGAU-MSHA named after K.A. Timiryazeva, 348 p. (in Russian)

7. Taratunin, A.A. (2008). Floods on the territory of the Russian Federation. Yekaterinburg: Publishing House of the Federal State Unitary Enterprise RosNIIVKh, 432 p. (in Russian)
8. Gagarina L.G., Teplova Ya.O. and Koltsova O.V. (2009). Development of software for designing a network of atmospheric monitoring posts. *News of higher educational institutions. Electronics*, 6 (80), 58-63. (in Russian)
9. Kondratieva O.V., Petukhova M.V. and Shchedrina E.V. (2022). The use of fuzzy sets for solving forecasting and optimization problems. *International Journal of the Humanities and Natural Sciences*, 3:(3:66), 169-172. (in Russian)
10. State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2018" (2018). Krasnoyarsk, 302 pp. (in Russian)
11. Kobozev D.D., Snezhko V.L. (2020). Assessing the impact of climate warming on the elements of the hydrological regime of the Sukhona River. *Innovations and Investments*, 11, 177-180. (in Russian)
12. Shalikovskiy, A.V., Lepikhin, A.P., Tiunov, A.A., Kurganovich, K.A. and Morozov, M.G. (2019). Floods in the Irkutsk region in 2019. *Water management of Russia*, 6, 48–65.