

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СРОКИ ПОЯВЛЕНИЯ ЛЬДА НА КАМСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

© 2024 г. К. Д. Микова^{1*}, В. Г. Калинин¹

¹Пермский государственный научно-исследовательский университет, Пермь, Россия

*e-mail: mikovak@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.07.2023 г.

После доработки 24.10.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2024 г.

Исследованы зависимости сроков появления льда от дат перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С к отрицательным значениям и температуры воды через 2 и 3 °С. Выявлено, что при проверке на независимом материале (1996–2021) оправдываемость прогнозов снизилась на 20%. Для улучшения оправдываемости предлагается разделить весь период наблюдений на группы с разными метеорологическими условиями осени.

Ключевые слова: водохранилище; лёдообразование; прогнозы замерзания

DOI: 10.31857/S2076673424010119

ВВЕДЕНИЕ

Образование льда происходит ежегодно на большинстве водных объектов России. Продолжительность периода со льдом составляет 5–6 месяцев (Донченко, 1987). Знание особенностей формирования и разрушения льда на водных объектах крайне необходимо для бесперебойной работы водного транспорта, эксплуатации гидротехнических сооружений, водозаборов, обеспечения безопасности населения. Поэтому прогнозирование характеристик ледового режима очень важно для эффективного управления водными объектами.

Первые исследования, посвящённые прогнозированию характеристик ледового режима водных объектов, появились в годы Великой Отечественной войны (Гидрометеорологическое..., 2023). Тогда же было опубликовано первое Руководство для прогнозов толщины ледового покрова (Руководство..., 1942). Позднее методикам краткосрочного прогноза сроков замерзания и вскрытия был посвящён целый ряд работ (Ширкин, 1945; Шуляковский, 1947, а–б; Бурдыкина, 1949; Балашова, 1954). Методы прогноза характеристик ледового режима рек и водохранилищ впервые были опубликованы в работах (Наставление..., 1962; Руководство..., 1963). В следующем издании (Руководство..., 1989) были внесены усовершенствования в существующие и добавлены новые методы прогнозов. При этом методы краткосрочных прогнозов замерзания водных объектов разделены на две группы. К первой группе отнесён метод, в основе которого лежит расчёт составляющих теплового

баланса на поверхности водоёма (Шуляковский, 1960), ко второй — методы, основанные на физико-статистических зависимостях от определяющих факторов. Прогнозы замерзания имеют заблаговременность 3–5 суток (Руководство..., 1989).

Изучению процессов ледообразования на камских водохранилищах посвящены работы (Матарзин, Макаров, 1962; Ефремова, 1965; Мацкевич, 1973; Калинин, 1993; Микова, 2007) предложена методика долгосрочного прогноза начала ледостава. В работах (Матарзин, Макарова, 1962; Мацкевич, 1973) дана характеристика особенностей замерзания на основе обобщения имеющихся сведений и установленных на тот момент закономерностей.

Для условий Камского водохранилища выявлены закономерности формирования ледового режима и получены надёжные эмпирические зависимости за репрезентативный стационарный 40-летний период (1956–1995) для краткосрочного и среднесрочного прогнозов их замерзания и вскрытия (Калинин, Микова, 2006). В настоящее время на Камском водохранилище период наблюдений составляет 66 лет (1956–2021). За последние 26 лет эти зависимости не проверялись и не уточнялись. Кроме того, с середины 1970-х годов (Шимараев и др., 2002; Георгиевский и др., 2014), а по другим оценкам — с 1980-х годов (Антропогенные..., 1986) на территории Российской Федерации наблюдается изменение климатических условий и, как следствие, изменение сроков замерзания водных объектов (Фролова и др., 2018; Калинин и др., 2021).

Это вызывает необходимость проведения новых исследований по оценке оправдываемости методик прогноза и их уточнения.

Цель работы — проанализировать и дать оценку эмпирических зависимостей сроков появления устойчивых ледяных образований от даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям и от дат устойчивого перехода среднесуточной температуры воды через 3 и 2°C в сторону понижения. Для реализации этой цели в работе решались следующие задачи: проверка полученных ранее связей на независимом материале (1996–2021); анализ применимости всего периода наблюдений (1956–2021) для построения прогностических зависимостей с оценкой их оправдываемости; исследование возможности использования для целей прогноза данных только за период современных климатических изменений (1996–2021); разработка методик прогноза, учитывающих разные метеорологические условия осеннего периода.

ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ

Водосбор Камского водохранилища охватывает территорию Верхней и Средней Камы и расположен на северо-востоке европейской части России. Частично водосбор расположен на территории Уральского горного массива, занимает площадь 1910 км^2 и имеет разнообразный рельеф, который включает в себя горы, равнины, холмы и долины. Климат умеренно-континентальный, с холодной зимой и тёплым летом. Зима обычно снежная, продолжительная. Средняя годовая температура воздуха изменяется от -2 до $+2^{\circ}\text{C}$. Средняя температура января на северо-востоке региона -18.5°C , а на юго-западе -13.3°C . Абсолютный минимум температуры на севере края достигает -53°C (Атлас..., 2012). Количество поступающей солнечной радиации распределяется неравномерно с севера на юг. В течение года северная часть водосбора получает на 15% меньше солнечного тепла, чем южная. Ещё большие изменения значений суммарной солнечной радиации наблюдаются по сезонам года. Летом на территорию водосбора поступает 80% годового количества тепла, а зимой около 20% (Шкляев, Балков, 1963). Переход среднесуточной температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям по средним многолетним данным наблюдается с 15 октября на севере до 26 октября на юге. В такие периоды осенью на реках и водохранилищах появляются первые ледяные образования.

Формирование ледяных образований в виде заберегов и сала на Камском водохранилище по средним многолетним данным начинается 27 октября на мелководьях краевых заливов и плёсов, где быстрее всего происходит выхолаживание водных масс. Далее замерзание происходит

последовательно с севера на юг от зоны выклинивания подпора (29 октября) до приплотинной глубоководной (13 ноября) части водохранилища.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходными данными для выполнения исследования послужили многолетние ряды наблюдений за температурой воздуха на метеостанциях, температурой воды и появлением льда в осенний период на гидрологических постах (г/п) Росгидромета (рис. 1) за весь период существования водохранилища (1956–2021). В качестве исследуемой характеристики использованы сроки появления устойчивых ледяных образований в осенний период. За дату появления устойчивых ледяных образований

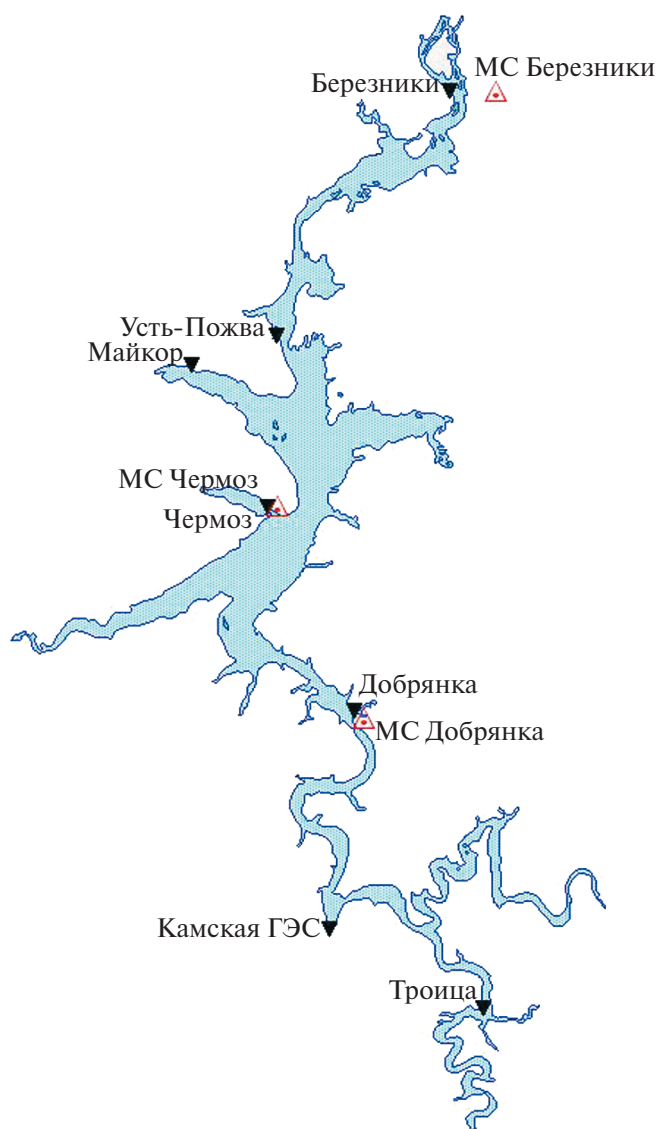


Рис. 1. Схема расположения метеорологических станций и гидрологических постов на Камском водохранилище.

Fig. 1. Location of weather stations and gauges on the Kamskoe Reservoir.

принята первая дата формирования заберегов, различных форм плавающего льда или шуги. В случае возврата тепла принималась первая дата, если период с ледяными образованиями был больше, чем последующий период “чисто”. Если период с ледяными образованиями был меньше, чем последующий период “чисто”, то за дату появления устойчивых ледяных образований принималась первая дата их появления после периода “чисто” (Калинин, Микова, 2006). Аналогичная методика принята и для определения даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С к отрицательным значениям, только в этом случае подсчитывались суммы отрицательных и положительных температур, а не продолжительность периода. По такой же методике определялись даты перехода температуры воды через 2 и 3 °С.

Все ряды наблюдений прошли проверку на случайность, соответствие нормальному закону распределения и однородность согласно методологическому подходу (Калинин, Чичагов, 2014). Проверка гипотезы случайности для всех рядов и отдельных их частей выполнена с помощью критерия инверсий. В результате для сроков появления устойчивых ледяных образований и сроков перехода температуры воды через 2 и 3 °С за весь период наблюдений 1956–2021 гг. выявлено отклонение гипотезы случайности для трёх из семи г/п, что свидетельствует о наличии значимых изменений, происшедших в рядах наблюдений. При этом для периодов 1956–1995 и 1996–2021 гг. гипотеза случайности принималась для всех постов. Для сроков перехода температуры воздуха через 0 °С гипотеза случайности принималась как за весь период наблюдений 1956–2021 гг., так и для периодов 1956–1995 и 1996–2021 гг. Тестирование рядов наблюдений на однородность выполнено с помощью критериев Стьюдента и Фишера. Предварительно данные были проверены на нормальность, где выявлено соответствие рядов нормальному закону распределения. Отклонение гипотезы однородности для периодов 1956–1995 и 1996–2021 гг. свидетельствует о наличии статистически значимых изменений в рядах наблюдений за период 1956–2021 гг.

Для гидрологических постов Камского водохранилища за репрезентативный 40-летний период 1956–1995 гг. была разработана методика прогноза, основанная на зависимости сроков появления устойчивых ледяных образований D от даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С к отрицательным значениям по ближайшей метеостанции $D_{0\text{ }^{\circ}\text{C}}$, а также даты перехода температуры воды через 3 и 2 °С в период остывания водоёма (Калинин, 2008).

Оценка методик прогноза проводилась в соответствии с (Наставлением..., 1962):

1) для краткосрочных (заблаговременность до 10 суток) и среднесрочных (заблаговременность 10–15 суток) прогнозов по средней квадратичной погрешности проверочных прогнозов $\bar{S}$ в зависимости от допустимой погрешности $\pm\delta_{\text{дон}}$. При этом допустимая погрешность краткосрочных прогнозов дат наступления явлений принималась в соответствии с предложением (Калинин, Микова, 2006) по половине заблаговременности Δ прогноза:

$$\pm\delta_{\text{дон}} = 0.5\Delta \quad (1)$$

для долгосрочных прогнозов (заблаговременность более 15 суток) по критерию $\bar{S}/\sigma$, где — средняя квадратичная погрешность проверочных прогнозов, σ — среднее квадратичное отклонение предсказываемой величины от нормы σ . Допустимая погрешность проверочных прогнозов ($\pm\delta_{\text{дон}}$, сут) рассчитывалась по формуле

$$\pm\delta_{\text{дон}} = 0.674 \cdot \sigma; \quad (2)$$

2) по величине обеспеченности допустимой погрешности P , вычисленной как вероятность превышения допустимой погрешности числа случаев, в которых ошибки проверочных прогнозов были меньше допустимой, к общему числу проверочных прогнозов.

Зависимости, установленные без учёта резко отклонившихся случаев, считались практически применимыми при следующих значениях обеспеченности допустимой погрешности:

при $n \geq 25$, $P > 75\%$; при $25 > n > 15$, $P > 80\%$; при $n < 15$, $P > 85\%$.

В результате выполненных ранее (Калинин, 2008) исследований получены зависимости с заблаговременностью от 4 до 20 суток для верхней (г/п Березники, Усть-Пожва), центральной (г/п Чермоз) и приплотинной (г/п Камская ГЭС) частей Камского водохранилища. Коэффициенты корреляции для этих зависимостей с датой перехода температуры воздуха через 0 °С к отрицательным значениям составили $0.66 \div 0.92$ (табл. 1, графа 2). По величине $\bar{S}$ в зависимости от допустимой погрешности $\pm\delta_{\text{дон}}$ три зависимости из семи удовлетворили критерию качества прогнозов. Обеспеченность допустимой погрешности P_I , рассчитанная на зависимом материале для этих же зависимостей, составила 76–95% (см. табл. 1, графа 5).

Зависимости с датой перехода температуры воды через 3 °С в период остывания водоёма характеризовались коэффициентами корреляции $0.62 \div 0.88$ при заблаговременности 7–12 суток. По критериям $\bar{S}$ и P также три зависимости удовлетворяли критерию качества прогнозов (см. табл. 1, графы 2–5).

Анализ аналогичных зависимостей с датой перехода температуры воды через 2 °С (см. табл. 1,

Таблица 1. Характеристики зависимостей для прогноза сроков появления устойчивых ледяных образований от даты устойчивого воздуха через 0°С к отрицательным значениям и дат перехода температуры воды через 3 °С и 2 °С

Гидрологический пост	1956–1995 гг.					1956–2021 гг.				1996–2021 гг.			
	<i>r</i>	Δ, сут	$\bar{S}$	$P_1, \%$	$P_2, \%$	<i>r</i>	Δ, сут	$\bar{S}$	$P_1, \%$	<i>r</i>	Δ, сут	$\bar{S}$	$P_1, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Зависимости с датами перехода температуры воздуха через 0 °С													
Березники	0.92	7	3.2	76	54	0.89	8	4.2	62	0.85	9	5.0	52
Усть-Пожва	0.90	8	3.8	84	54	0.92	8	3.7	57	0.88	9	4.2	64
Майкор	0.91	4	3.1	63	46	0.93	4	3.0	66	0.89	5	4.2	48
Чермоз	0.87	6	4.0	66	50	0.90	7	3.9	63	0.87	7	3.8	61
Добрянка	0.74	11	6.1	55	35	0.81	12	6.4	42	0.85	14	5.9	68
КамГЭС*	0.70	20	0.70	95	58	0.68	19	0.74	73	0.58	18	0.83	56
Троица	0.66	14	6.3	58	69	0.76	14	6.3	59	0.79	14	5.8	52
Зависимости с датами перехода температуры воды через 3 °С													
Березники	0.62	12	6.5	78	58	0.69	12	6.1	76	0.78	11	5.7	86
Усть-Пожва	0.73	9	5.7	54	42	0.74	9	5.7	62	0.70	10	5.6	67
Майкор	0.72	9	5.4	59	42	0.73	10	5.9	56	0.74	12	5.8	64
Чермоз	0.88	10	4.0	84	42	0.79	11	5.5	80	0.60	13	6.4	68
Добрянка	0.81	7	5.5	49	38	0.81	8	6.1	63	0.74	13	6.0	88
КамГЭС	0.85	10	4.5	85	64	0.81	10	5.0	77	0.65	9	5.8	67
Троица	0.76	8	5.6	53	46	0.75	9	6.0	60	0.57	9	6.5	55
Зависимости с датами перехода температуры воды через 2 °С													
Березники	0.80	8	4.5	71	58	0.80	8	5.3	66	0.74	8	6.4	48
Усть-Пожва	0.92	4	3.4	63	23	0.84	6	4.9	47	0.74	7	5.8	50
Майкор	0.93	4	3.0	54	31	0.81	6	5.1	52	0.74	8	5.7	45
Чермоз	0.88	7	4.1	75	50	0.84	8	4.7	60	0.71	9	5.8	67
Добрянка	0.92	3	3.7	49	36	0.87	4	5.2	29	0.80	7	5.3	38
КамГЭС	0.86	6	4.4	55	44	0.86	6	4.8	54	0.82	6	5.6	44
Троица	0.86	5	4.3	48	33	0.86	4	4.6	47	0.74	4	5.3	45

r — коэффициент корреляции; Δ — средняя заблаговременность прогноза, сут; $\bar{S}$ — средняя квадратичная погрешность проверочного прогноза, сут; P_1 — обеспеченность допустимой погрешности на зависимом материале; P_2 — обеспеченность допустимой погрешности на независимом материале. Жирным шрифтом выделены значения критериев и P обеспеченности допустимой погрешности для г/п, у которых зависимости имеют качество прогностических.

*Для г/п КамГЭС в графах 4, 9 и 13 помещена величина $\bar{S}/\sigma$, так как зависимость имеет долгосрочную заблаговременность.

графы 2–5) показал, что теснота этих связей *r* выше (0.80÷0.93) за счёт уменьшения заблаговременности (3–8 суток). Однако при уменьшении заблаговременности снижается и допустимая ошибка прогноза. Это приводит к уменьшению величины $P_1 \leq 71\%$, что не позволяет использовать зависимости в качестве методики прогнозов сроков ледообразования. В то же время зависимости,

удовлетворяющие соответствующим критериям, были внедрены в Пермский ЦГМС для выпуска прогнозов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проверка полученных ранее зависимостей на независимом материале (1996–2021). Анализ

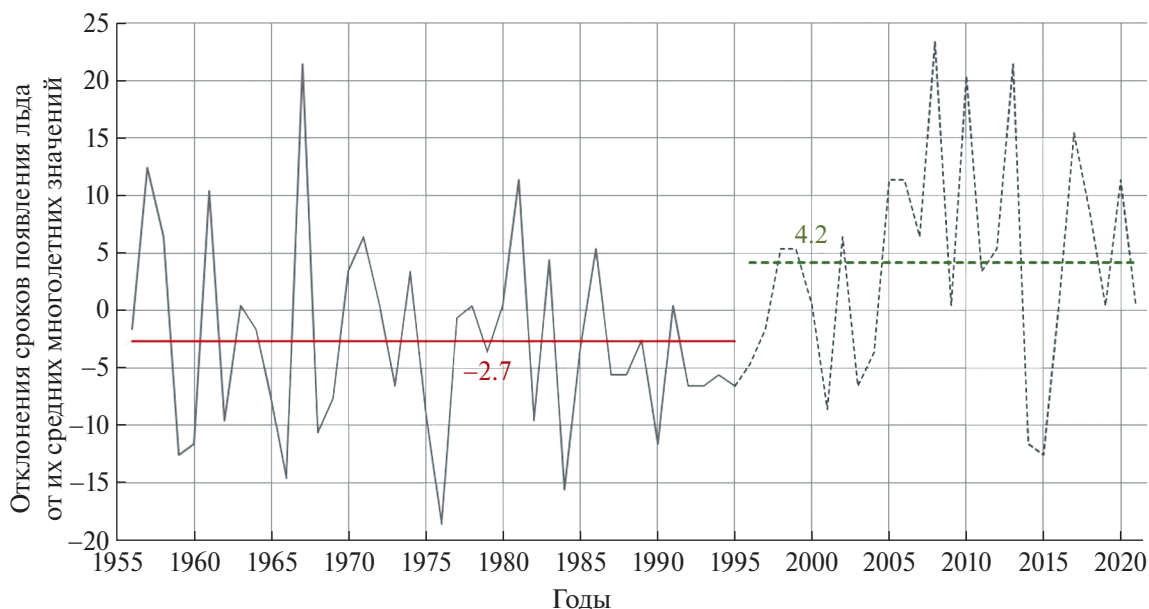


Рис. 2. Ежегодные отклонения сроков появления устойчивых ледяных образований (ΔD , сут) от их средних многолетних значений за 1956–2021 гг. по г/п Березники для двух периодов: 1956–1995 гг. (1) и 1996–2021 гг. (2).

Fig. 2. Annual deviations in the stable ice dates formations (ΔD , days) from their average long-term values for 1956–2021 by gauge station Berezniki for two periods: 1956–1995 (1) and 1996–2021 (2).

оправдываемости прогнозов на независимом материале P_2 показал, что на большинстве постов по всем исследуемым зависимостям оправдываемость снизилась в среднем на 20% (см. табл. 1, графы 5–6). Причиной этого может быть увеличение амплитуды отклонений ежегодных дат от их средних многолетних значений и смещение сроков замерзания на более поздние даты после 1995 г. Например, по г/п Березники в период 1956–1995 гг. преобладали отрицательные отклонения сроков (среднее значение отклонений составило -2.7 суток) (рис. 2). В последующие 26 лет (1996–2021 гг.) отклонения от средних значений этих сроков стали преимущественно положительными ($+4.2$ суток), при этом они увеличились по абсолютной величине. Тенденции в смещении сроков замерзания на более поздние даты в последние десятилетия подтверждены в работе (Калинин и др., 2021).

Период 1956–1995 гг. в целом характеризовался редкими возвратами тепла после перехода температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям, которые наблюдались 1–2 раза за десятилетие. В результате проведённых ранее исследований (Калинин и др., 2021) выявлено, что для условий Камского водохранилища начало выраженных климатических изменений приходится на 1996 г. После 1996 г. возвраты тепла осенью стали более частыми — 3–4 раза за десятилетие, поэтому даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям, а также даты перехода температуры воды

через 3 и 2°C в период остывания водоёма стали наблюдаться в более поздние сроки.

Анализ применимости всего периода наблюдений (1956–2021) для построения прогностических зависимостей с оценкой их оправдываемости. Анализ зависимостей, построенных за весь период наблюдений 1956–2021 гг., показал, что заблаговременность (см. табл. 1, графы 3, 8), как и теснота связей (см. табл. 1, графы 2, 7) по ним практически не изменились. Результаты проверки зависимостей с датами перехода температуры воздуха через 0°C и температуры воды через 2°C по критериям $\bar{S}$ ($\bar{S}/\sigma$) и P_i показали, что за период 1956–2021 гг. большинство зависимостей соответствуют критерию, при этом P_i стало ниже 75%. Такое снижение качества можно объяснить увеличением амплитуды дат устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C , температуры воды через 2°C и сроков появления устойчивых ледяных образований за период 1996–2021 гг. Ни одна из полученных зависимостей не может быть использована для составления прогнозов.

Зависимости с датами перехода температуры воды через 3°C по сравнению с периодом 1956–1995 гг. практически не изменились, что свидетельствует об устойчивости данного фактора к возвратам тепла (табл. 1, графы 9–10). При этом зависимости также только по трём г/п Березники, Чермоз и КамГЭС могут быть использованы для выпуска краткосрочных прогнозов сроков ледообразования.

Таблица 2. Повторяемость (%) ошибок прогноза сроков появления устойчивых ледяных образований за 1956–2021 гг.

Ошибка прогноза, сут	От даты перехода температуры воздуха через 0 °С				От даты перехода температуры воды через 3 °С				От даты перехода температуры воды через 2 °С			
	Березники		Усть-Пожва		Добрянка		Троица		Березники		Чермоз	
	1956–1995 гг.	1996–2021 гг.	1956–1995 гг.	1996–2021 гг.	1956–1995 гг.	1996–2021 гг.	1956–1995 гг.	1996–2021 гг.	1956–1995 гг.	1996–2021 гг.	1956–1995 гг.	1996–2021 гг.
> 1	76	72	76	71	85	88	93	82	84	78	74	96
> 2	58	60	54	54	75	79	73	77	68	61	51	78
> 3	37	44	43	38	65	58	60	68	53	57	41	61
> 4	21	28	24	25	55	38	58	59	32	39	36	48
> 5	8	16	11	21	40	33	40	41	21	30	26	35
> 6	0	12	3	4	30	33	28	36	11	22	18	17
> 7	0	12	0	4	25	17	15	23	8	22	8	9
> 8	0	12	0	4	10	17	8	18	5	17	3	4
> 9	0	8	0	0	8	13	5	18	5	17	3	0
> 10	0	8	0	0	5	8	3	18	3	17	3	0
> 11	0	8	0	0	3	8	3	5	0	13	3	0

Увеличение частоты возвратов тепла в период замерзания за 1996–2021 гг. привело к росту повторяемости больших положительных ошибок прогнозов (табл. 2) и, как следствие, снижению их оправдываемости. Анализ повторяемости ошибок прогноза в процентах от общего числа прогнозов выполнен для двух периодов (1956–1995 и 1996–2021) на примере зависимостей, допускаемая ошибка прогноза которых одинакова и составляет ± 4 сут. Это зависимости сроков появления устойчивых ледяных образований от дат устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С (г/п Березники, Усть-Пожва), температуры воды через 3 °С (г/п Добрянка, Троица) и температуры воды через 2 °С (г/п Березники, Чермоз). Расчёты показали, что для периода 1996–2021 гг. характерно увеличение больших ошибок (> 6–11 сут) в 2–3 раза (см. табл. 2).

Исследование возможности использования для целей прогноза данных только за период современных климатических изменений (1996–2021). Анализ зависимостей для прогноза сроков ледообразования от дат перехода температуры воздуха через 0 °С и температуры воды через 2 °С, построенных за период 1996–2021 гг., показал, что заблаговременность практически не изменилась. Однако ни одна из зависимостей не соответствует критерию обеспеченности допустимой погрешности P_I , которая стала ниже на 11–14% по сравнению с величиной P_I за 1956–1995 гг. (см. табл. 1, графы 5, 14). Таким

образом, эти зависимости нельзя рекомендовать для прогнозов сроков ледообразования.

Теснота связи и заблаговременность выпускаемых прогнозов у зависимостей с датой перехода температуры воды через 3 °С изменились незначительно (см. табл. 1, графы 2–3, 11–12). Оправдываемость P_I стала выше в среднем на 13%, за исключением г/п Чермоз и КамГЭС. При этом только две зависимости (г/п Березники и Добрянка) имеют $P_I \geq 75\%$ и могут быть использованы для выпуска прогнозов.

Следует отметить, что зависимости с высокими коэффициентами корреляции r (0.89) и заблаговременностью 5 сут не удовлетворили ни одному из критериев. В то же время зависимости с более низкими коэффициентами корреляции r ($0.74 \div 0.78$) и большей заблаговременностью (11–13 сут) удовлетворили обоим критериям ($\bar{S}$ и P_I).

Разработка методик прогноза, учитывающих разные метеорологические условия осеннего периода. Выполненные исследования свидетельствуют о проблеме использования разработанных методик, поскольку они не учитывают возвраты тепла осенью. В 1992, 1996, 2015 и 2017 гг. возвраты тепла были отмечены на всех гидропостах. Анализ условий ледообразования в эти годы позволил выявить причины столь сильных отклонений. Так, осень 1992 г. характеризовалась сложными атмосферными процессами. Устойчивый переход температуры

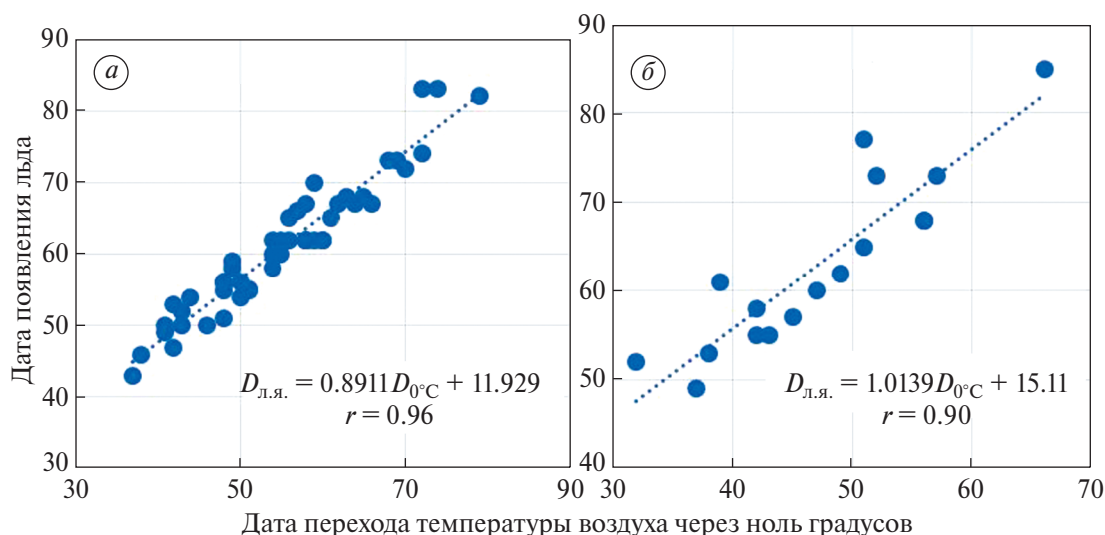


Рис. 3. Зависимости для прогноза дат появления льда от дат перехода температуры воздуха через 0 °C ($D_{0^{\circ}\text{C}}$) на г/п Березники: годы с устойчивым похолоданием (а); для лет с возвратами тепла (даты пересчитаны от 1 сентября) (б).

Fig. 3. Correlations for forecasting of the ice dates vice the zero-isotherm dates at the Berezniki gauge station: years with stable cooling (a); years with heat returns (dates recalculated from 01st September) (б).

воздуха через 0 °C наблюдался во второй декаде октября (12 октября), что на 13 дней раньше средних многолетних значений (25 октября). Однако с конца октября период с отрицательными температурами сменялся оттепелями, которые продолжались до конца ноября. Сумма положительных температур во время возврата тепла была меньше, чем сумма отрицательных температур предшествующего периода, поэтому согласно методике за дату перехода температуры воздуха через 0 °C была принята дата 12 октября. В то же время появление ледяных образований из-за возврата тепла на рассматриваемых г/п наблюдалось на 12–30 дней позже средних многолетних значений. Аналогична картина развития процессов и в 1996, 2015, 2017 гг.

В течение периода 1996–2021 гг. потепления наблюдались чаще (1 раз в 3–4 года), чем в 1956–1995 гг. (1 раз в 5 лет). За 1956–2021 гг. накопилось достаточно данных по годам с возвратами тепла. Поэтому решение проблемы возможно путём разделения всего периода наблюдений на две группы: в первой группе собраны годы с устойчивым похолоданием, а во второй — годы с возвратами тепла (рис. 3). Для каждой группы лет построены зависимости сроков появления устойчивых ледяных образований от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °C к отрицательным значениям и дат перехода температуры воды через 3° и 2 °C и выполнена их оценка по критериям $\bar{S}$ ($\bar{S}/\sigma$) и P (табл. 3).

Как видно из табл. 1 (графа 10), при использовании всего периода наблюдений (1956–2021 гг.) ни одна из зависимостей сроков появления устойчивых ледяных образований от даты

перехода температуры воздуха через 0 °C не соответствует обоим критериям (и P) методики прогнозов. В то же время после разделения этой зависимости на группы ситуация резко изменилась (см. табл. 3). В первой группе, где зависимости построены для лет с устойчивым похолоданием, заблаговременность прогнозов уменьшилась до 2–16 суток, а теснота связи и оправдываемость увеличились ($r = 0.85–0.96$; $P = 74–88\%$). Из-за увеличения тесноты связей (r) стала существенно ниже средняя квадратичная погрешность проверочного прогноза ($\bar{S} = 2.6–5.1$). Зависимости, построенные для лет с возвратами тепла, имеют большую заблаговременность (13–32 суток). Таким образом, для лет с устойчивым похолоданием у всех зависимостей заблаговременность прогноза уменьшается в среднем на 2 суток, а для лет с возвратами тепла — увеличивается в среднем на 10 суток. При этом практически все зависимости (кроме г/п Чермоз) имеют высокую оправдываемость ($P = 76–94\%$) и пригодны для выпуска прогнозов. Заблаговременность зависимостей для разных г/п составляет от 10 до 16 суток, а в годы с возвратами тепла на г/п Камской ГЭС — до 32 суток.

Температура воды имеет меньшую суточную изменчивость по сравнению с температурой воздуха, поэтому сроки перехода температуры воды через определённые пределы в период осеннего охлаждения водохранилища более устойчивы. Качество большинства зависимостей с датой перехода температуры воды через 3 °C соответствует требованиям, предъявляемым к методикам прогноза. Для данного типа зависимостей характерно

Таблица 3. Характеристики зависимостей для прогноза сроков появления устойчивых ледяных образований от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С и дат перехода температуры воды через 3 и 2 °С

Гидрологический пост	Годы с устойчивым похолоданием				Годы с возвратами тепла			
	r	Δ , сут	$\bar{S}$	P_1 , %	r	Δ , сут	$\bar{S}/\sigma$	P_1 , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Зависимости с датами перехода температуры воздуха через 0 °С								
Березники	0.96	6	2.6	88	0.90	16	0.47	94
Усть-Пожва	0.95	6	2.8	86	0.87	17	0.52	94
Майкор	0.91	2	4,0	31	0.74	13	0.69	93
Чермоз	0.96	5	2.7	74	0.72	17	0.72	71
Добрянка	0.90	10	5.1	63	0.77	24	0.64	76
КамГЭС	0.85	16	4.9	65	0.90	32	0.48	81
Троица	0.90	10	4.6	75	0.78	25	0.67	80
Зависимости с датами перехода температуры воды через 3 °С								
Березники	0.83	10	4.0	82	0.78	27	0.65	76
Усть-Пожва	0.86	8	4.2	86	0.71	24	0.73	63
Майкор	0.80	8	4.5	71	0.61	25	0.82	53
Чермоз	0.89	9	3.8	80	0.70	25	0.73	75
Добрянка	0.91	6	4.0	59	0.90	19	0.45	87
КамГЭС	0.86	7	3.4	83	0.95	17	0.33	83
Троица	0.89	6	4.0	50	0.88	18	0.50	56
Зависимости с датами перехода температуры воды через 2 °С								
Березники	0.91	6	3.2	75	0.86	21	0.53	86
Усть-Пожва	0.93	4	2.8	60	0.79	17	0.63	75
Майкор	0.91	4	3.1	62	0.53	22	0.89	62
Чермоз	0.93	6	3.4	67	0.89	18	0.47	93
Добрянка	0.95	2	3.2	43	0.91	13	4.8*	88
КамГЭС	0.93	4	3.1	54	0.96	13	2.4*	100
Троица	0.95	3	2.8	51	0.89	13	4.2*	87

r — коэффициент корреляции; Δ — средняя заблаговременность прогноза, сут; $\bar{S}$ — средняя квадратичная погрешность проверочного прогноза, сут; P_1 — обеспеченность допустимой погрешности на зависимом материале; $\bar{S}/\sigma$ — критерий качества для долгосрочных зависимостей; * — приведены величины $\bar{S}$ (критерий качества для среднесрочных прогнозов). Жирным шрифтом выделены значения критериев $\bar{S}$ и P_1 обеспеченности допустимой погрешности для г/п, у которых зависимости имеют качество прогностических.

уменьшение тесноты связи с увеличением средней заблаговременности (см. табл. 3). Четыре зависимости из семи имеют высокую оправдываемость (см. табл. 3, графы 5, 9), причём как для лет с устойчивым похолоданием ($P = 80–86\%$), так и для лет с возвратами тепла ($P = 75–87\%$). Следует также отметить, что для группы лет с возвратами тепла заблаговременность прогноза увеличилась. Методики прогноза по этим зависимостям перешли в категорию долгосрочных.

Результаты расчётов по зависимостям с датой перехода температуры воды через 2 °С для лет с устойчивым похолоданием практически не изменились — только одна зависимость имеет качество прогностической (г/п Березники). У группы лет с возвратами тепла, наоборот, — для шести из семи зависимостей характерна высокая оправдываемость ($P = 75–100\%$). Таким образом, учёт устойчивости похолоданий осенью приводит к улучшению качества

прогностических зависимостей. А решение о том, какую зависимость применять при составлении прогноза в текущем году, следует принимать на основе сценария развития метеорологических условий осени в этом году по прогнозу погоды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ зависимостей сроков ледообразования от рассмотренных факторов показал, что оправдываемость выпускаемых прогнозов на независимом материале (1996–2021) снизилась в среднем на 20% по сравнению с оправдываемостью на зависимом материале (1956–1995). Причина заключается в учащении возвратов тепла в период замерзания осенью, увеличении отклонений сроков ледообразования от средних многолетних значений и их смещении на более поздние даты с 1995 г. Это привело к увеличению повторяемости больших ошибок и снижению оправдываемости прогнозов в 1996–2021 гг.

2. Использование всего имеющегося периода наблюдений 1956–2021 гг. не привело к заметному уточнению исследуемых зависимостей. Величина R для зависимостей от даты устойчивого перехода температуры воды через 3 °С практически не изменилась, в то время как от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С и температуры воды через 2 °С заметно снизилась по всем постам. По критериям $\bar{S}$ и R только три зависимости от даты устойчивого перехода температуры воды через 3 °С (для г/п Березники, Чермоз и Камская ГЭС) можно использовать в качестве методики прогнозов сроков ледообразования.

3. Зависимости от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С и температуры воды через 2 °С, построенные за период 1996–2021 гг., не соответствуют критериям $\bar{S}$ и R . В то же время для г/п Березники и Добрянка зависимости от даты устойчивого перехода температуры воды через 3 °С можно использовать в качестве методики прогнозов сроков ледообразования. Для периода 1996–2021 гг. характерно увеличение больших ошибок (> 6 –11 сут) в 2–3 раза.

4. Улучшение оправдываемости прогнозов появления льда на водохранилищах возможно путём разделения всего периода наблюдений на группы с разными метеорологическими условиями осени и построения зависимостей отдельно для каждой группы (годы с устойчивым похолоданием и с возвратами тепла). Учёт устойчивости похолоданий улучшил качество прогностических зависимостей, что даёт возможность использовать их для планирования сроков окончания навигации на Камском водохранилище. Критерием использования той или иной зависимости в конкретном году служит прогноз погоды.

ЛИТЕРАТУРА

- Антропогенные изменения климата / Под ред. М. И. Будыко и Ю. А. Израэля. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 405 с.
- Атлас Пермского края / Под ред. А. М. Тартаковского. Пермь: Пермский гос. национальный исследовательский ун-т, 2012. 124 с.
- Балашова И. В. Краткосрочные прогнозы замерзания зарегулированных рек (на примере Верхней Волги). Л.: Гидрометеоздат, 1954. Вып. 34. 61 с.
- Бефани Н. Ф., Калинин Г. П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 389 с.
- Бурдыкина А. П. О методике фоновых прогнозов сроков вскрытия и замерзания рек арктической зоны Сибири // Тр. ААНИИ. 1949. Т. 22. 170 с.
- Георгиевский В. Ю., Георгиевский М. В., Голованов О. Ф., Шальгин А. Л. Воздействия изменений климата на природные системы суши // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 30–37.
- Гидрометеорологическое обеспечение советской армии в Великой Отечественной войне // Электронный ресурс. <https://meteoinfo.ru/9may> (Дата обращения: 28.06.2023).
- Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 242 с.
- Ефремова Н. Д. Методика долгосрочного прогноза начала ледостава на Камском водохранилище // Тр. Центрального ин-та прогнозов. Вып. 151. 1965. С. 34–35.
- Калинин В. Г. Ледовый режим рек и водохранилищ бассейна Верхней и Средней Камы: монография / Ред. В. Г. Калинин. Пермь: Пермский гос. ун-т, 2008. 252 с.
- Калинин В. Г. Особенности пространственно-временной динамики формирования ледовых явлений на Камском водохранилище. Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Пермь: Пермский гос. науч.-исслед. ун-т, 1993. 17 с.
- Калинин В. Г., Микова К. Д. О зависимостях сроков наступления ледовых явлений и критериях их оценки (на примере камских водохранилищ) // Метеорология и гидрология. 2006. № 12. С. 96–100.
- Калинин В. Г., Микова К. Д., Чичагов В. В. Влияние современных климатических изменений на сроки ледообразования на Камском водохранилище // Тр. VIII Всеросс. науч.-практич. конф. с междунар. участием. Пермь: Пермский гос. науч.-исслед. ун-т, 2021. С. 94–99.
- Матарзин Ю. М., Макарова Т. П. О возможности прогноза ледовых явлений на Камском водохранилище // Учен. записки Пермского ун-та. 1962. Т. 21. № 3. С. 121–167.

- Мацкевич И. К. Особенности гидрологии Воткинского водохранилища в связи с его положением в каскаде. Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Пермь: Пермский гос. науч.-исслед. ун-т, 1973. 223 с.
- Микова К. Д. Ледовый режим Воткинского водохранилища и методики его прогноза. Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Пермь: Пермский гос. науч.-исслед. ун-т, 2007. 24 с.
- Наставление по службе прогнозов. Раздел III. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 362 с.
- Руководство для прогнозов толщины ледового покрова на реках и озёрах. М.: Гидрометеиздат, 1942. 55 с.
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 3. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 168 с.
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 4: Прогнозы ледовых явлений на реках и водохранилищах. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 291 с.
- Фролова Н. Л., Магрицкий Д. В., Киреева М. Б., Агафонов С. А., Повалишников Е. С. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. 2018. Вып. 145. С. 233–251.
- Шимараев М. Н., Куимова Л. Н., Синюкович В. Н., Цехановский В. В. Климат и гидрологические процессы в бассейне озера Байкал в XX веке // Метеорология и гидрология. 2002. № 3. С. 71–78.
- Ширкина Н. А. Методика фоновых прогнозов сроков вскрытия и замерзания рек бассейна Амура. М.: Гидрометеиздат, 1945. 64 с.
- Шкляев А. С., Балков В. А. Климат Пермской области. Пермь: Пермское книжное изд-во, 1963. 189 с.
- Шуляковский Л. Г. К методике краткосрочных прогнозов замерзания и вскрытия рек // Тр. ЦИП. 1947. № 5. С. 3.
- Шуляковский Л. Г. О механизме вскрытия рек, текущих на север // Тр. ЦИП. 1947. Вып. 6. С. 97–111.
- Шуляковский Л. Г. Появление льда и начало ледостава на реках, озёрах и водохранилищах: Расчёты для целей прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 216 с.

Citation: Mikova K. D., Kalinin V. G. Correlations checking of the ice dates from main factors for forecasting on the Kama Reservoir. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (1): 143–154. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424010119

Factors determining the timing of ice appearance on the Kama Reservoir

K. D. Mikova^{a#}, V. G. Kalinin^a

^aPerm State University, Perm, Russia

[#]e-mail: mikovak@yandex.ru

Received July 27, 2023; revised October 24, 2023; accepted March 31, 2024

The analysis and assessment of the correlations of the ice dates vice the zero-isotherm dates, dates of water temperatures transition through 2 and 3 °C were carried out. The initial data were long-term series of observations of air temperature at weather stations, water temperature and ice dates at the gauge stations of Roshydromet for the whole period of the reservoir existence (1956–2021). As the characteristic under study, the dates of ice formation in autumn were used. Main results: verification of previously obtained correlations on independent data (1996–2021) showed that the accuracy of issued forecasts (*P*) was decreased by 20% compared with the accuracy on dependent data (1956–1995); an analysis of the whole period applicability (1956–2021) for constructing predictive correlations with an assessment of their justification showed that there was no noticeable refinement. The accuracy of the forecasts based on the dates of water temperatures transition through 3 °C has not changed, while forecasts based on the zero-isotherm dates and the dates of water temperatures transition through 2 °C, has noticeably decreased at all stations; the use of data only for the period of modern climate changes (1996–2021)

led to the following: correlations of the ice dates vice the zero-isotherm dates and water temperature through 2 °C did not pass the criteria $\bar{S}$ and P . This period is characterized by a decrease in the frequency of small forecast errors (< 4–5 days) and an increase in large errors (> 6–11 days) by 2–3 times; a forecast technique is proposed based on the separation of the studied correlations for years with different meteorological conditions in autumn (years with stable cooling and with heat returns). The criterion for using this or that dependence in a particular year is the weather forecast. Forecasts issued according to such dependencies have a higher accuracy.

Keywords: reservoir, ice formation, ice dates forecasts

REFERENCES

- Antropogennyye izmeneniya klimata*. Anthropogenic climate change. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1986: 405 p. [In Russian].
- Atlas Permskogo kraya*. Atlas of the Perm kray. Perm: Perm State University, 2012: 124 p. [In Russian].
- Balashova I. V. *Kratkosrochnye prognozy zamerzaniya zaregulirovannykh rek (na primere Verhney Volgi)*. Short-term forecasts of freezing of regulated rivers (on the example of the Upper Volga). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1954, 34: 61 p. [In Russian].
- Befani N. F., Kalinin G. P. *Uprazhneniya i metodicheskie razrabotki po gidrologicheskim prognozam*. Exercises and methodological developments on hydrological forecasts. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983: 389 p. [In Russian].
- Burdykina A. P. On the method of large-area forecasts for the break-up and freezing of rivers in the Arctic zone of Siberia. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*. Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute. 1949, 22: 170 p. [In Russian].
- Georgievskij V. Yu., Georgievskij M. V., Golovanov O. F., Shalygin A. L. *Vozdeystviya izmenenij klimata na prirodnye sistemy sushy*. Impacts of climate change on natural land systems. *Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii*. The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the Russian Federation territory. Moscow: Roshydromet, 2014: 30–37 [In Russian].
- Gidrometeorologicheskoe obespechenie sovetской armii v Velikoj Otechestvennoy vojne*. Retrieved from: <https://meteoinfo.ru/9may> (Last access: 28 June 2023) [In Russian].
- Donchenko R. V. *Ledovyj rezhim rek SSSR*. Ice regime of the rivers of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1987: 242 p. [In Russian].
- Efremova N. D. *Metodika dolgosrochnogo prognoza nachala ledostava na Kamskom vodohranilishhe*. Methodology for long-term forecasting of the freezing date at the Kama Reservoir. *Trudy Centralnogo instituta prognozov*. Proc. of the Central Institute of Forecasts. 1965, 151: 34–35 [In Russian].
- Kalinin V. G. *Ledovyj rezhim rek i vodohranilish bassejna Verhney i Sredney Kamy*. Ice regime of rivers and reservoirs in the catchment of the Upper and Middle Kama River. Perm: Perm State University, 2008: 252 p. [In Russian].
- Kalinin V. G. *Osobennosti prostranstvenno-vremennoj dinamiki formirovaniya ledovykh yavlenij na Kamskom vodohranilishhe*. Features of spatio-temporal dynamics of the formation of ice phenomena in the Kama reservoir. PhD Thesis. Perm: Perm State University, 1993: 17 p. [In Russian].
- Kalinin V. G., Mikova K. D. On the correlations of the ice dates and the criteria for their assessment (on the example of the kamskiye reservoirs). *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2006, 12: 96–100 [In Russian].
- Kalinin V. G., Mikova K. D., Chichagov V. V. Influence of modern climatic changes on the ice dates formation in the Kama Reservoir. *Trudy VIII Vserossiiskoy nauchno-prakticheskoi konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. Perm: Perm State University, 2021: 94–99 [In Russian].
- Matarzin Yu. M., Makarova T. P. On the Possibility of Predicting Ice Phenomena in the Kama Reservoir. *Uchenyye zapiski Permskogo universiteta*. Scientific notes of Perm State University. 1962, 21 (3): 121–167. [In Russian].
- Mackevich I. K. *Osobennosti gidrologii Votkinskogo vodohranilisha v svyazi s ego polozheniem v kaskade*. Features of the hydrology of the Votkinsk reservoir in connection with its position in the cascade. PhD Perm: Perm State University. 1973: 223 p. [In Russian].
- Mikova K. D. *Ledovyj rezhim Votkinskogo vodohranilisha i metodiki ego prognoza*. Ice regime of the Votkinsk Reservoir and methods of its forecast. PhD Thesis. Perm: Perm State University. 2007: 24 p. [In Russian].

- Nastavlenie po sluzhbe prognozov.* Manual on the service of forecasts. III. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1962: 362 p. [In Russian].
- Rukovodstvo dlya prognozov tolshiny ledovogo pokrova na rekah i ozerah.* Guidelines for forecasting the thickness of the ice cover on rivers and lakes. Moscow: Hydrometeoizdat, 1942: 55 p. [In Russian].
- Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam.* Guidelines for Hydrological Forecasts. Issue 3. *Prognoz ledovyh yavlenij na rekah i vodohranilishah.* Forecast of ice phenomena on rivers and reservoirs. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1989: 168 p. [In Russian].
- Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam.* Manual of hydrological forecasts. Issue 4. *Prognozy ledovyh yavlenij na rekah i vodohranilishah.* Forecasts of ice events on rivers and reservoirs. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1963: 291 p. [In Russian].
- Frolova N. L., Magrickij D. V., Kireeva M. B., Agafonova S. A. Anthropogenic and climatically determined changes in water runoff and ice phenomena in the rivers of the Russian Arctic. *Voprosy geografii.* Questions of Geography. 2018, 145: 233–251 [In Russian].
- Shimaraev M. N., Kuimova L. N., Sinyukovich V. N., Cehanovskij V. V. Climate and hydrological processes in the Baikal basin in the 20th century. *Meteorologiya i gidrologiya.* Meteorology and Hydrology. 2002, 3: 71–78 [In Russian].
- Shirkina N. A. *Metodika fonovyh prognozov srokov vskrytiya i zamerzaniya rek bassejna Amura.* Methodology of background forecasts for the opening and freezing of the rivers of the Amur basin. Moscow: Hydrometeoizdat, 1945: 64 p. [In Russian].
- Shklyayev A. S., Balkov V. A. *Klimat Permskoj oblasti.* The climate of the Perm region. Perm: Perm Book Publishing House, 1963: 189 p. [In Russian].
- Shulyakovskij L. G. On the methodology of short-term forecasts of freezing and opening of rivers. *Trudy Central'nogo instituta prognozov.* Proc. of the Central Institute of Forecasts. 1947, 5: 3 p. [In Russian].
- Shulyakovskij L. G. On the mechanism of the rivers break-up flowing to the north. *Trudy Central'nogo instituta prognozov.* Proc. of the Central Institute of Forecasts. 1947, 6: 97–111 [In Russian].
- Shulyakovskij L. G. *Poyavlenie l'da i nachalo ledostava na rekah, ozyorah i vodohranilishchah: Raschyoty dlya celej prognozov.* The appearance of ice and the beginning of ice formation on rivers, lakes and reservoirs: Calculations for the purposes of forecasts. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1960: 216 p. [In Russian].