

Гидрологические расчеты и прогнозы для рек Верхней Колымы и Северного Приохотоморья в условиях климатических изменений

Михаил Вилорьевич УШАКОВ

кандидат географических наук, старший научный сотрудник

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
Магадан, Россия

mvilorich@narod.ru, [orcid 0000-0003-1731-7541](https://orcid.org/0000-0003-1731-7541)

Аннотация. В работе приведен краткий обзор гидрологических исследований, проведенных в Северо-Восточном комплексном научно-исследовательском институте им. Н.А. Шило ДВО РАН. Исследования начались в 2011 г. с приходом автора в институт. Тематика исследований была обусловлена вызовами, связанными с процессом глобального потепления климата, а именно потребовались методы и подходы по учету климатических изменений в практике гидрологических расчетов и прогнозов для рек Верхней Колымы и Северного Приохотоморья. Исходные ряды наблюдений исследовались на наличие тренда с использованием критерия Стьюдента и Херста. Для исследования характера многолетних колебаний элементов гидрологического режима временные ряды подвергались низкочастотной фильтрации методом скользящей средней и спектральному анализу. При разработке прогностических моделей применялись скользящая регрессия и гармонические уравнения. Установлены корреляционные связи между 30-летними скользящими средними годового и летне-осеннего минимального стока рек Северного Приохотоморья со среднегодовой температурой воздуха. На основе этих связей получены формулы для вычисления норм элементов гидрологического режима при различных сценариях потепления климата. Рассчитано современное внутригодовое распределение стока рек Верхней Колымы. Для прогноза месячного и квартального прогноза притока воды к водохранилищам на р. Колыма предложен метод скользящей регрессии на трех переменных. Многолетние колебания суммарного притока к каскаду водохранилищ на р. Каменушка были представлены в отклонениях от линии тренда. Эти отклонения имеют статистически значимые циклы длительностью 6, 10, 11 лет. По этим гармоникам было составлено уравнение, при помощи которого можно предвычислять колебания годового притока. При разработке методов прогноза дат вскрытия и замерзания р. Колыма был также успешно применен метод скользящей регрессии. Предложенные методы и подходы будут полезны гидрологам, занимающимся гидрологическими расчетами и прогнозами.

Ключевые слова: речной сток, ледовые явления, гидрологические расчеты и прогнозы, потепление климата

Для цитирования: Ушаков М.В. Гидрологические расчеты и прогнозы для рек Верхней Колымы и Северного Приохотоморья в условиях климатических изменений // Тихоокеанская география. 2023. № 4. С. 52–63. https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_5. EDN: JZPLJD.

Hydrological calculations and forecasts for the rivers of Upper Kolyma and Northern Priokhotomorie in the context of climate change

Mikhail V. USHAKOV

Candidate of Geographical Sciences, Senior research associate

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan, Russia

mvilorich@narod.ru, orcid_0000-0003-1731-7541

Abstract. The paper provides a brief overview of the hydrological studies carried out at the North-Eastern Complex Research Institute n.a. N.A. Shilo FEB RAS. Research began in 2011 with the arrival of the author at the institute. The subject of research was determined by the challenges associated with the process of global climate warming, namely, methods and approaches were required to take into account climate changes in the practice of hydrological calculations and forecasts for the rivers of Upper Kolyma and Northern Priokhotomorie. The initial series of observations were examined for the presence of a trend using the Student and Hurst test. To study the nature of long-term fluctuations in the elements of the hydrological regime, the time series were subjected to low-frequency filtering by the moving average method and spectral analysis. Moving regression and harmonic equations were used to develop predictive models. Correlations were found between the 30-year moving averages of the annual and summer-autumn minimum runoff of the rivers in Northern Priokhotomorie with the average annual air temperature. Based on these relationships, formulas were obtained for calculating the norms of elements of the hydrological regime under various scenarios of climate warming. The current intra-annual distribution of the runoff of the Upper Kolyma rivers is calculated. To forecast the monthly and quarterly forecast of water inflow to reservoirs on the Kolyma River a method of sliding regression on three variables was proposed. Long-term fluctuations in the total inflow to the cascade of reservoirs on the Kamenushka River were presented in deviations from the trend line. These deviations have statistically significant cycles lasting 6, 10, 11 years. Based on these harmonics, an equation was drawn up, which that makes possible to predict the fluctuations of the annual inflow. When developing methods for predicting the dates of opening and freezing of the Kolyma River the method of moving regression was successfully applied as well. The proposed methods and approaches will be useful to hydrologists involved in hydrological calculations and forecasts.

Keywords: river flow, ice phenomena, climate, hydrological calculations and forecasts, climate warming

For citation: Ushakov M.V. Hydrological calculations and forecasts for the rivers of Upper Kolyma and Northern Priokhotomorie in the context of climate change. *Pacific Geography*. 2023;(4):52-63. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2023_16_5.

Введение

Происходящие на планете климатические изменения [1–6], влекут за собой различные трансформации гидрологического режима рек. Например, в работе [7] были исследованы компоненты гидрологического режима рек Сибири. В термическом режиме не замечены существенные изменения, но выявлено, что продолжительности ледостава и толщины льда уменьшаются. Кроме того, наблюдается увеличение стока подземных вод таежной зоны. В северных зонах тундры увеличиваются площади озер, а в южных районах тундры и тайги озера теряют площадь. По мнению авторов, ожидается, что сток рек в основных водосборных бассейнах Сибири увеличится, и этот результат согласуется с большинством прогнозов глобальных климатических моделей на XXI в.

В работах [8, 9] установлено, что в 1976–2017 гг. с территории Сибири и Дальнего Востока годовой сток рек в арктические моря увеличился на 7 % по сравнению с предыдущим 30-летием. На реках северо-восточного сектора явный рост стока отмечен с середины 1990-х гг. Больше всего годовой сток рек вырос на территории Республики Саха (Якутии) (до 18 %). Рост слоя стока продолжался в течение всех последних лет, о чем свидетельствуют положительные и нередко значимые линейные тренды. Общее уменьшение или «стабильное поведение» стока за этот же период обнаружено на реках Обского Севера и Крайнего Северо-Востока. Рост температур зимнего периода приводит к повышенному питанию грунтовых вод, что опосредованно влияет на водность межени. Практически во всех исследованиях отмечается рост зимних расходов воды для большинства рек. Так, зимний сток р. Колыма увеличился на 169 %. Эти выводы подтверждает исследование [10], где зафиксировано статистически значимое увеличение стока рек Восточной Якутии после 1980 г., особенно в осенне-зимние месяцы.

Происходящие трансформации гидрологического режима ставят перед гидрологами задачи по учету этих изменений при проведении гидрологических расчетов и прогнозов.

В настоящей статье представлен краткий обзор исследований, проведенных в вышеуказанном направлении в Северо-Восточном комплексном научно-исследовательском институте им. Н.А. Шило ДВО РАН (СВКНИИ ДВО РАН) в 2012–2022 гг. Следует упомянуть, что результативность проводимых исследований связана с сотрудничеством с

такими организациями, как Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Колымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

В настоящей работе под Верхней Колымой понимается бассейн р. Колыма до гидрологического поста у п. Усть-Среднекан. Северное Приохотоморье включает в себя бассейны рек, впадающих в северную часть Охотского моря от устья р. Тауя до устья р. Гижига (рис. 1). Природные условия и гидрологический режим рек рассматриваемой территории подробно описаны в [11, 12]. Водные ресурсы рек используются в горной промышленности, энергетике, рыбной промышленности, коммунальном хозяйстве.



Рис. 1. Верхняя Колыма и Северное Приохотоморье

Fig 1. Upper Kolyma and Northern Priokhotomorie

Материалы и методы

В гидрологическом отношении регион плохо изучен [13]. Исходные данные по речному стоку, ледовым явлениям были взяты из Гидрологических ежегодников государственного Водного кадастра. Метеорологические данные имеются в свободном доступе на сайте Росгидромета [14].

Временные ряды исследовались на наличие тренда с использованием критерия Стьюдента [15] и Херста [16]. Ряды подвергались низкочастотной фильтрации методом скользящей средней. Для исследования частотной структуры многолетних колебаний элемен-

тов гидрологического режима проводился спектральный анализ. Спектральная функция рассчитывалась с использованием весовой функции Хэмминга, а статистическая значимость ординат спектрограммы оценивалась по критерию Тьюки [17]. Для построения прогностических моделей применялась скользящая регрессия и гармонические уравнения.

Результаты и обсуждения

Гидрологические расчеты. В работе [18] было установлено, что положительный тренд многолетних колебаний температур воздуха и сумм атмосферных осадков за год повлек за собой увеличение годового стока рек, расположенных в г. Магадан и прилегающих к нему территориях (Примагаданье). По хронологическим графикам скользящих 30-летних средних можно видеть, как со временем менялись «нормы» (рис. 2). Так, увеличение суммы осадков и речного стока за год началось с «нормы», рассчитанной за период 1977–2006 гг., а рост температуры начался еще раньше. С учетом этого были рассмотрены корреляционные связи рассматриваемых гидрометеорологических характеристик: «норм», рассчитанных за 1977–2006 гг. и 1987–2016 гг.

Судя по коэффициентам корреляции r , эти связи довольно тесные:

$$P30_i = 103t30_i + 836, \quad r = 0.93, \quad (1)$$

$$M30_i = 0,041P30_i - 5.38, \quad r = 0.96, \quad (2)$$

$$M30_i = 4,46t30_i + 29.54, \quad r = 0.94, \quad (3)$$

где $P30_i$, $t30_i$, $M30_i$ – скользящие 30-летние средние годовой суммы осадков (мм), среднегодовой температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) и модуля годового стока р. Дукча в устье ($\text{л/с}\cdot\text{км}^2$) соответственно; i – год окончания 30-летки ($i = 1986, 1987, \dots, 2016$).

Существует множество сценариев повышения среднегодовой температуры воздуха на планете в XXI в. [19, 20]. Поэтому по формулам (1), (2), (3) можно рассчитывать «нормы» годовой суммы осадков в г. Магадан и модуля годового стока р. Дукча при различных вариантах потепления. Например, если к 2050 г. среднегодовая температура воздуха в г. Магадан поднимется на 1°C по отношению к «норме», рассчитанной за 1987–2016 гг. (достигнет величины $-1,4^{\circ}\text{C}$), то «норма» модуля годового стока за 2021–2050 гг. увеличится на 26 % и составит $23.3 \text{ л/с}\cdot\text{км}^2$. По аналогичной схеме можно составить расчетные формулы вида (3) и для других рек Примагаданья.

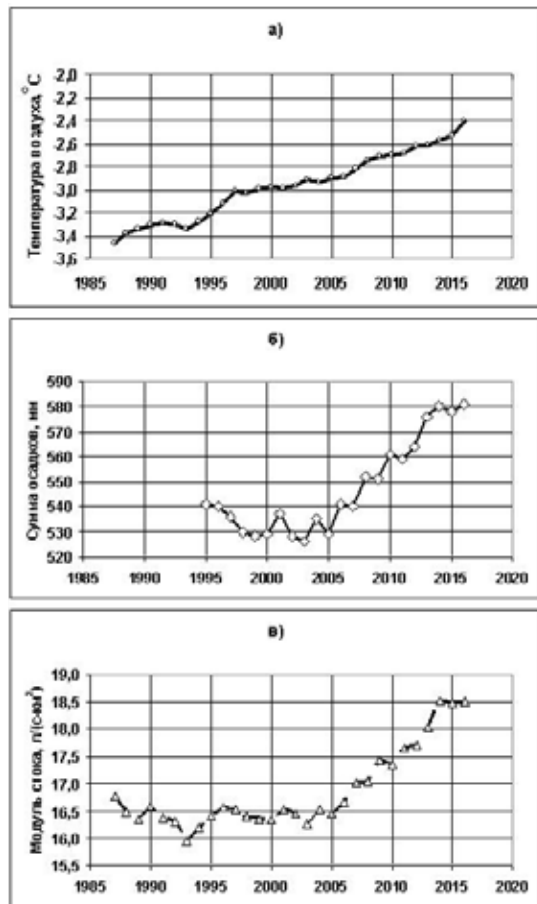


Рис. 2. Многолетний ход 30-летних скользящих средних температуры воздуха (а), годовой суммы осадков (б) в г. Магадан и модуля годового стока р. Дукча в устье (в). По оси абсцисс – годы окончания 30-летних периодов осреднения. Составлено по [18]

Fig. 2. The long-term course of 30-year moving averages of air temperature (a), annual precipitation (b) in Magadan and the module of the annual runoff of the Dukcha River at the mouth (c). The abscissa shows the years of the end of the 30-year averaging periods. Compiled according to [18]

Таким образом, при построении кривых обеспеченности годового стока для различных сценариев потепления климата необходимо исправлять «норму» модуля стока по формуле (3). Для примера в табл. 1 приведены ожидаемые «нормы» модулей стока р. Дукча в устье при трех сценариях климатических изменений.

Таблица 1

«Нормы» модуля годового стока р. Дукча в устье при различных сценариях потепления климата

Table 1. «Norms» of the module of the annual runoff of the Dukcha River at the mouth under different climate warming scenarios

Река – пункт	Средний модуль годового стока (л/с*км ²) при повышении «нормы» среднегодовой температуры воздуха на		
	0° С	1° С	2° С
р. Дукча – устье	18.5	23.3	27.8

Таким же образом были проанализированы климатические изменения минимального летне-осеннего суточного модуля стока рек Северного Приохотоморья [21]. Так, скользящие 30-летние средние модуля стока Q_{30} р. Хасын и температуры воздуха t_{30} в г. Магадан связаны между собой следующим образом:

$$Q_{30_i} = 0,97t_{30_i} + 8,28, R^2 = 0,87, \quad (4)$$

где i – год окончания 30-летнего периода.

Пользуясь формулой (4), можно рассчитать норму минимального суточного модуля расхода воды р. Хасын при различных сценариях повышения нормы среднегодовой температуры воздуха. К примеру, если к 2050 г. норма среднегодовой температуры воздуха в г. Магадан повысится на 1 °С, то норма модуля минимального суточного стока на р. Хасын увеличится на 13 % по сравнению с нормой, рассчитанной за 1976–2015 гг.

Глобальное потепление климата обусловило существенные изменения во внутригодовом распределении стока Верхней Колымы [22]. Почти во все месяцы года увеличился сток за счет роста увлажненности. Благодаря тому, что весеннее половодье стало начинаться раньше, произошло увеличение стока в мае и уменьшение его в июне–июле (рис. 3). Среднегодовое значение стока за лимитирующий период существенно выросло – на 37,9 %, причем этот прирост произошел главным образом в нелимитирующий сезон.

Гидрологические прогнозы. В работах [23–25] показано, что в условиях меняющегося климата прогнозы притока воды к Колымскому и Усть-Среднеканскому водохранили-

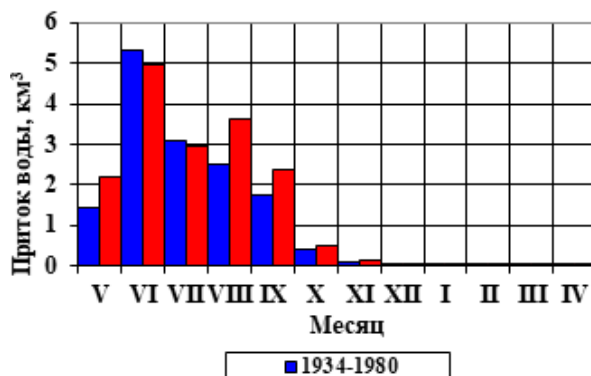


Рис. 3. Внутригодовое распределение притока воды в Колымское водохранилище за водохозяйственный год до 1980 г. и после [22]

Fig 3. Intra-annual distribution of water inflow into the Kolymskoye Reservoir during for the water management year before 1980 and after [22]

щам на месяц и квартал можно успешно осуществлять с использованием метода скользящей множественной регрессии.

Для прогноза притока воды в Колымское водохранилище на май i -го года [23] были отобраны два месячных индекса атмосферной циркуляции: западно-тихоокеанский индекс за сентябрь в год $i - 16$ (W_{i-16}); полярно-евразийский индекс за июль в год $i - 11$ (P_{i-11}):

$$Q_i = aW_{i-16} + bP_{i-11} + c. \quad (5)$$

Получение параметров a , b и c прогностического уравнения (5) производилось по скользящей обучающей выборке длиной 20 лет, т.е. они тоже являются переменными, зависящими от времени.

Верификация предложенной модели показала, что отношение средней квадратичной ошибки прогнозов к среднеквадратическому отклонению S/σ прогнозируемого ряда составило 0.73 (табл. 2). Оправдываемость проверочных прогнозов составила 85.7 %. Для сравнения отметим, что при использовании традиционного подхода, когда параметры уравнения регрессии постоянны, отношение $S/\sigma = 0.81$.

Таблица 2

Фрагмент таблицы проверочных прогнозов притока в Колымское водохранилище на май (допустимая ошибка 280 м³/с)

Table 2. Fragment of the table of verification forecasts for the inflow to the Kolyma Reservoir in May (acceptable error 280 m³/s)

Год	Фактический приток, м ³ /с	Качество прогнозов по предлагаемой методике (подстройка параметров уравнения регрессии по скользящей обучающей выборке)			Качество прогнозов по методике с постоянными параметрами уравнения регрессии		
		прогноз	ошибка	оценка	прогноз	ошибка	оценка
2000	681	308	-373	-	421	-260	+
2001	1040	981	-59	+	966	-74	+
2002	1010	554	-456	-	391	-619	-
2003	177	213	36	+	-68	-245	+
2004	843	785	-58	+	922	79	+
2005	553	562	9	+	450	-103	+
2006	542	367	-175	+	251	-291	-
2007	1510	611	-899	-	620	-890	-
2008	1290	1053	-237	+	1056	-234	+
2009	864	956	92	+	942	78	+
2010	733	860	127	+	639	-94	+
2011	530	793	263	+	661	131	+

Примечание. Знаком «+» обозначены оправдавшиеся прогнозы, знаком «-» – неоправдавшиеся.

Для прогноза притока в Колымское водохранилище на второй квартал [24] было получено уравнение скользящей регрессии:

$$Q_2 = aS + bQ_3 + c, \quad (6)$$

где Q_2 – приток воды во втором квартале, м³/с; S – максимальные запасы воды в снежном покрове на 10 апреля, мм; Q_3 – приток воды в третьем квартале предыдущего года, м³/с; a , b , c – переменные во времени коэффициенты.

Оправдываемость проверочных прогнозов по формуле (6) составила 70.0 %. Отношение средней квадратичной ошибки прогнозов к среднеквадратическому отклонению прогнозируемого ряда S/σ составило 0.72, при традиционном подходе – 0.74.

В работе [25] получена формула для прогноза суммарного притока воды в Колымское и Усть-Среднеканское водохранилища (каскад) на второй квартал:

$$Q_i = aS_i + bP_{i-6} + c, \quad (7)$$

где Q_i – приток воды во втором квартале в год i , м³/с; S_i – максимальные снегозапасы в год i , мм; P_{i-6} – полярный индекс атмосферной циркуляции за октябрь в год $i-6$, м³/с.

Верификация предложенной модели показала, что оправдываемость прогнозов составила 76.2 %, отношение $S/\sigma = 0.66$, при традиционном подходе – 0.74.

В г. Магадан функционирует каскад из двух водохранилищ на р. Каменушка для обеспечения города питьевой водой. Ряд суммарного годового притока воды к каскаду этих водохранилищ имеет тренд на повышение, который хорошо аппроксимируется полиномом третьей степени [26]. Ряд притока был представлен в отклонениях от линии тренда:

$$\Delta P_i = P_i - (ai^3 + bi^2 + ci + d). \quad (8)$$

Спектральный анализ ряда отклонений годового притока от линии тренда выявил статистически значимые циклы продолжительностью 6, 10, 11 лет (рис. 4). С вероятностью 95 % можно утверждать, что многолетние колебания годового притока соответствуют статистической модели сложной цепи Маркова [17].

Динамику отклонений от тренда можно рассматривать как гармонические колебания с тремя гармониками с периодами 6, 10, 11 лет и наложенным шумом. Эти колебания можно аппроксимировать уравнением

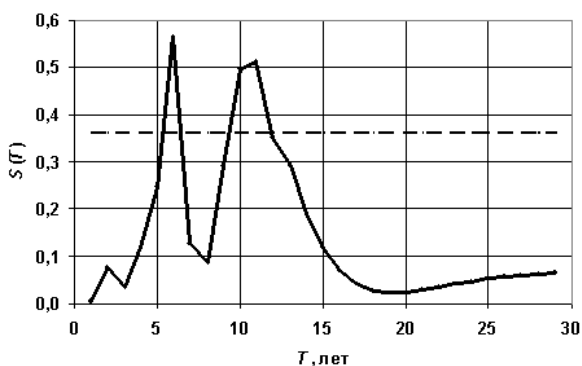


Рис. 4. Спектрограмма колебаний суммарного притока воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушка (пунктиром проведена доверительная граница при уровне значимости 5 %)

Fig. 4. Spectrogram of fluctuations in the total inflow of water to the cascade of reservoirs on the Kamenushka River (dotted line shows the confidence limit at a significance level of 5 %)

$$\begin{aligned} \Delta P_i^* = & 0.218 \cos(2\pi(i-1954)/6) + \\ & + 0.200 \cos(2\pi(i-1956)/10) + \\ & + 0.200 \cos(2\pi(i-1952)/11) + 0.36. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, получен метод предвычисления многолетних колебаний притока в отклонениях от тренда. Учитывая (8), прогнозное значение притока на год i будет иметь следующий вид:

$$P_i^* = ai^3 + bi^2 + ci + d + \Delta P_i^*. \quad (10)$$

Проверочные прогнозы показали неплохую сходимость фактических и предвычисленных значений притока (рис. 5). Отношение среднеквадратичной ошибки прогнозов к стандартному отклонению исходного ряда составило 0.73, оправдываемость – 64.4 %.

Для предвычисления колебаний суммарного годового притока к каскаду водохранилищ предлагается ежегодно уточнять параметры тренда в уравнении (8).

Климатические изменения зафиксированы и в ледовом режиме рек [27–30]. На сроки начала ледохода р. Колыма влияют не только изменения климата, но и режим регулирования стока каскадом ГЭС. Даты начала ледохода р. Колыма хорошо связаны между собой [28], а это говорит о том, что временные ряды дат вскрытия являются реализациями одного динамико-стохастического процесса. Эти ряды были представлены в отклонениях от среднего (аномалиях)

$$\Delta D_{i,j} = D_{i,j} - D_j, \quad (11)$$

где $D_{i,j}$ – погодичные значения дат вскрытия в год i в пункте j ; D_j – средняя дата вскрытия в пункте j .

Затем было рассчитан ряд средней динамической аномалии дат вскрытия р. Колыма по формуле

$$\Delta D_i = \sum_{j=1}^6 \Delta D_{i,j} / 6. \quad (12)$$

После элиминации тренда спектральный анализ показал, что средняя аномалия дат вскрытия р. Колыма имеет 9–10-летнюю цикличность (рис. 6). Наличие статистически значимых циклов и отсутствие связи между смежными членами ряда свидетельствуют о том, что ряды вскрытия можно рассматривать как сложный процесс Маркова.

Таким образом, учитывая все вышесказанное, мы имеем дело с нестационарным динамико-стохастическим Марковским процессом. Сроки начала ледохода могут иметь дальние асинхронные связи с гидрометеорологическими процессами на планете, количественным выражением которых выступают различные индексы атмосферной циркуляции и индексы связи «океан – атмосфера».

Поиск предикторов и построение прогностической модели производились при помощи регрессионного анализа с привлечением взаимных корреляционных функций. Установлено, что суровость зимы (средняя температура воздуха за период октябрь–апрель) и максимальные запасы воды в снежном покрове не сказываются на сроках начала ледохода на р. Колыма. На процессы разрушения ледяного покрова влияет количество тепла, поступающего весной. Выявлена хорошая связь дат вскрытия р. Колыма с датами перехода температуры воздуха через 0°C весной в п. Сеймчан. В среднем переход температуры воз-

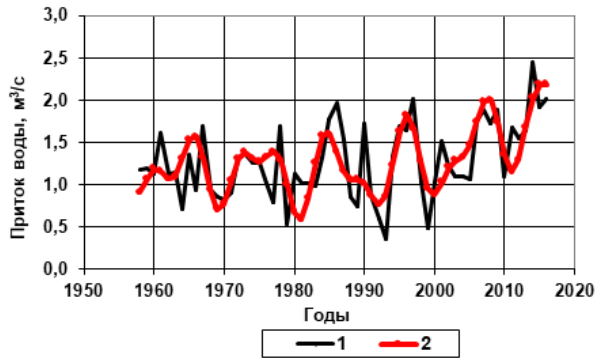


Рис. 5. Суммарный годовой приток воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушка (1) и его предвычисленные значения (2) [20].

Fig. 5. The total annual inflow of water to the cascade of reservoirs on the Kamenushka River (1) and its predicted values (2) [20].

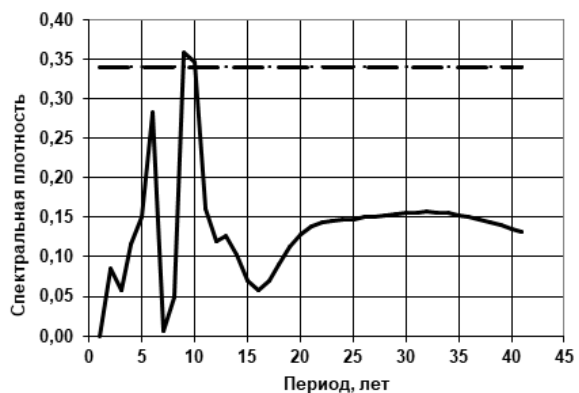


Рис. 6. Спектрограмма аномалии дат вскрытия р. Колыма (пунктиром обозначена доверительная граница при уровне значимости 5 %). Составлено по [28]

Fig. 6. Spectrogram of the anomaly in the ice drift beginning dates on the Kolyma River (the dotted line denotes a confidence limit with a significance level of 5 %). According to [28]

духа через 0 °С происходит 6 мая, а значит, средняя заблаговременность прогнозов будет составлять 15–20 дней.

Анализ взаимных корреляционных функций связи дат вскрытия и различных индексов атмосферной циркуляции выявил приемлемый предиктор – полярно-евразийский индекс за ноябрь. Для каждого пункта прогностическое уравнение скользящей регрессии при окне 30 лет будет иметь вид

$$D_{i,j} - D_j = a_i T_i + b_i P_{i-9} + c_i, \quad (8)$$

где D_j – средняя дата вскрытия в пункте j ; a_i, b_i, c_i – коэффициенты скользящей регрессии (ежегодно меняются); T_i и P_{i-9} – соответственно даты перехода температуры воздуха через 0 °С весной в п. Сеймчан в год i и полярно-евразийский индекс за ноябрь в год $i-9$.

Проверочные прогнозы по формуле показали хорошее качество прогностической модели (табл. 3).

Таблица 3

Качество методики прогноза дат вскрытия р. Колыма

Table 3. The quality of the method for predicting the opening dates of the Kolyma River

Пункт	Отношение средней квадратичной ошибки прогноза к стандартному отклонению ряда (S/σ)	Оправдываемость прогнозов, %
Сеймчан	0.53	85.1
Бальгыччан	0.60	71.4
Коркодон	0.47	85.7
Зырянка	0.44	92.9
Среднеколымск	0.50	85.7
Среднее по участку	0.50	84.2

В конце прошлого века в многолетних колебаниях сроков замерзания р. Колыма у г. Среднеколымск обнаружена четко выраженная тенденция на повышение [29]. Линия тренда была описана полиномом второй степени

$$D^*_i = 0.002383i^2 - 9.3531i + 9220, \quad (9)$$

где i – календарный год (четыре цифры).

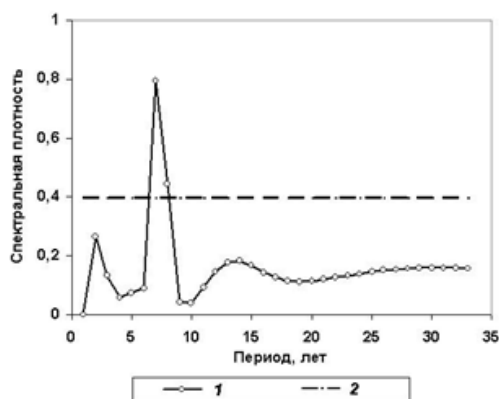


Рис. 7. Спектрограмма отклонений дат замерзания от линии тренда (1). Доверительный уровень 5% (2). Составлено по [29]

Fig. 7. Spectrogram of deviations of freezing dates from the trend line (1). Confidence level 5% (2). According to [29]

Исходный ряд дат замерзания D_i был представлен в отклонениях от линии тренда

$$\Delta D_i = D_i - D^*_i. \quad (10)$$

Спектральный анализ показал, что отклонения от тренда имеют статистически значимые пики на периодах 7 и 8 лет (рис. 7). Таким образом, можно сказать, что многолетние колебания дат установления ледостава на р. Колыма также представляют сложный Марковский процесс с трендом на повышение.

Уравнение скользящей регрессии с окном 20 лет для прогноза отклонений дат замерзания от линии тренда выглядит следующим образом:

$$\Delta D_i = a_i T_i + b_i Z_{i-9} + c_i, \quad (11)$$

где i – год; $a_i, b_{i,g}, c_i$ – параметры уравнения скользящей регрессии; T_i – дата осеннего перехода температуры воздуха через 0°C ; $Z_{i,g}$ – зональный индекс атмосферной циркуляции Блиновой за июнь.

С учетом (8), (9), (11) окончательное прогностическое уравнение будет иметь вид

$$D_i = 0.002383i^2 - 9.3531i + 9220 + a_iT_i + b_iZ_{i-9} + c_i. \quad (12)$$

Заблаговременность прогноза лежит в пределах 13–28 дней.

Проверочные прогнозы за последние 20 лет показали, что оправдываемость составила 85.0 %, отношение среднеквадратичной ошибки прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины $S/\sigma = 0.68$.

Заключение

Исследования, проведенные в СВКНИИ ДВО РАН в 2012–2022 гг., позволили выявить ряд климатических изменений в режиме рек Верхней Колымы и Северного Приохотоморья. Для их учета при проведении гидрологических расчетов устанавливались корреляционные связи 30-летних скользящих средних гидрологической характеристики со среднегодовой температурой воздуха, при помощи которых определялись расчетные величины характеристики при различных сценариях потепления климата. Для рек Верхней Колымы было рассчитано актуальное внутригодовое распределение стока.

При разработке методов среднесрочных и долгосрочных прогнозов элементов водного и ледового режимов хорошо зарекомендовал себя метод скользящей регрессии, а также предвычисление многолетних колебаний прогнозируемого элемента по гармоникам с предварительной элиминацией тренда.

Предложенные методы и подходы будут полезны специалистам, занимающимся инженерной гидрологией.

Литература

1. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO–No. 1167. Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 2016. 26 p.
2. Khazheeva Z.I., Plyusnin A.M. Variations in Climatic and Hydrological Parameters in the Selenga River Basin in the Russian Federation // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. N 9 (41). P. 640–647.
3. Meleshko V.P., Kattsov V.M., Baidin A.V., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Expected Change of Hydrologic Cycle in Northern Eurasia due to Disappearance of Multiyear Sea Ice in the Arctic Ocean // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. N 11–12. P. 735–746.
4. Gartsman B.I., Lupakov S.Yu. Effect of Climate Changes on the Maximal Runoff in the Amur Basin: Estimation Based on Dynamic–Stochastic Simulation // *Water Resources*. 2017. N 5(44). P. 697–706.
5. Шапов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Макагонова М.А., Бугаец А.Н., Гончуков Л.В. Оценка гидрологических откликов на изменения климата в Дальневосточном регионе России // *Географические исследования на Дальнем Востоке. Итоги и перспективы*. 2012–2016 гг. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2018. С. 99–109.
6. Glotov V.E., Ushakov M.V. Climate-related changes in the runoff of polar rivers in Western Chukotka // *Earth's cryosphere*. Vol. 24. 2020. N 6. P. 27–37.
7. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Lettenmaier D.P., Polischuk Yu.M., Savichev O.G.; Smith L.C.; Chernokulsky A.V. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. Part of the Springer Environmental Science and Engineering book series. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4569-8_4 (дата обращения: 8.11.2020).
8. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Повалишникова Е.С. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек российской Арктики // *Вопросы географии*. 2018. Т. 245. С. 233–251.
9. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021. Т. 7, № 1. С. 36–79.

10. Makarieva O., Nesterova N., Post D. A., Sherstyukov A., Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // *The Cryosphere*. 2019. N 13. P. 1635–1659.
11. Север Дальнего Востока / под ред. Н.А. Шило. М.: Наука, 1970. 487 с.
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 282 с.
13. Ушаков М.В. О продолжающемся кризисе стационарной гидрологической сети на Северо-Востоке России // Роль стационарных наблюдений в современных географических исследованиях. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2022. С. 159–161.
14. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации–Мировой центр данных. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 13.01.2021).
15. Шелутко В.А. Численные методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 238 с.
16. Hurst H.E. Long-term storage capacity of reservoirs // *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1951. N 116. P. 70–808.
17. Шелутко В.А. Статистические модели и методы исследования многолетних колебаний стока. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 160 с.
18. Ушаков М.В. Схема расчета ресурсов речных вод Примагаданья в условиях меняющегося климата // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2018. № 3. С. 76–79.
19. Булгаков К.Ю., Мелешко В.П., Шпееров Б.Е. О чувствительности климата к удвоению концентрации CO₂ в атмосфере // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2007. Вып. 556. С. 2–28.
20. Dodd E.M., Merchant C.J., Rayner N.A., Morice C.P. An investigation into the impact of using various techniques to estimate Arctic surface air temperature anomalies // *Journal of Climate*. 2015. N 5. P. 1743–1763.
21. Ушаков М.В. Климатический отклик минимального летне-осеннего стока рек северного Приохотоморья // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология*. 2019. Т. 5 (71), № 1. С. 238–246.
22. Ушаков М.В. Характер климатических изменений внутригодового распределения стока Верхней Колымы // *Общество, среда, развитие*. 2021. № 2. С. 86–89.
23. Соколов О.В., Ушаков М.В. Учет климатических изменений при прогнозировании притока воды в Колымское водохранилище на май // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. Вып. 566. 2012. С. 289–297.
24. Ушаков М.В. Усовершенствование прогноза притока воды в Колымское водохранилище в условиях климатических изменений // *Инженерные изыскания*. 2016. № 3. С. 40–44.
25. Ушаков М.В. Методика долгосрочного прогноза притока воды к каскаду водохранилищ на реке Колыме на второй квартал // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2018. Т. 4 (70), № 2. С. 269–280.
26. Ушаков М.В. Многолетние колебания годового притока воды к каскаду водохранилищ на реке Каменушке и их предвычисление // *Общество. Среда. Развитие*. 2018. № 4. С. 139–145.
27. Ушаков М.В. Влияние Колымской ГЭС и климатических изменений на гидрологический режим р. Колыма // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2013. № 2. С. 20–24.
28. Ушаков М.В. Методика прогноза дат вскрытия верхнего судоходного участка р. Колыма в условиях нестационарности // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2018. № 1. С. 49–55.
29. Ушаков М.В. Прогноз сроков замерзания реки Колымы в условиях климатических и антропогенных изменений // *Геополитика и экогодинамика регионов*. 2020. Т. 6 (16), вып. 4. С. 191–202.
30. Ушаков М.В. Продолжительность ледового сезона на реках Тайуйской губы в условиях климатических изменений // *Геополитика и геоэкодинамика регионов*. 2022. Т. 8, вып. 2. С. 236–245.

References

1. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO–No. 1167. Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 2016; 26 p.
2. Khazheeva, Z. I.; Plyusnin, A. M. Variations in Climatic and Hydrological Parameters in the Selenga River Basin in the Russian Federation. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016, 41(9), 640-647.
3. Meleshko, V.P.; Kattsov, V.M.; Baidin, A.V.; Pavlova, T.V.; Govorkova, V.A. Expected Change of Hydrologic Cycle in Northern Eurasia due to Disappearance of Multiyear Sea Ice in the Arctic Ocean. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016, 41(11-12), 735-746.
4. Gartsman, B.I.; Lupakov, S.Yu. Effect of Climate Changes on the Maximal Runoff in the Amur Basin: Estimation Based on Dynamic–Stochastic Simulation. *Water Resources*. 2017, 44(5), 697-706.
5. Shamov, V.V.; Gartsman, B.I.; Gubareva, T.S.; Lupakov, S.Yu.; Makagonova, M.A.; Bugaets, A.N.; Gonchukov, L.V. Assessment of hydrological responses to climate change in the Far East region of Russia. In *Geographical studies in the Far East. Results and prospects*. 2012-2016. PGI FEB RAS: Vladivostok, Russia, 2018, 99-109. (In Russian)
6. Glotov, V.E.; Ushakov, M.V. Climate-related changes in the runoff of polar rivers in Western Chukotka. *Earth's cryosphere*. 2020, XXIV(6), 27–37.

7. Shiklomanov, A.I.; Lammers, R.B.; Lettenmaier, D.P.; Polischuk, Yu.M.; Savichev, O.G.; Smith, L.C.; Chernokulsky, A.V. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. Part of the Springer Environmental Science and Engineering book series. Available online: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4569-8_4 (accessed on 8 November 2020).

8. Frolova, N.L.; Magritsky, D.V.; Kireeva, M.B.; Agafonova, S.A.; Povalishnikova, E.S. Anthropogenic and climatically determined changes in water flow and ice phenomena in the rivers of the Russian Arctic. *Questions of Geography*. 2018, 245, 233-251. (In Russian)

9. Gelfan, A.N.; Frolova, N.L.; Magritsky, D.V.; Kireeva, M.B.; Grigoriev, V.Yu.; Motovilov, Yu.G.; Gusev, E.M. Influence of climate change on the annual and maximum runoff of Russian rivers: assessment and forecast. *Fundamental and applied climatology*. 2021, 7(1), 36-79. (In Russian)

10. Makarieva, O.; Nesterova, N.; Post, D. A., Sherstyukov, A.; Lebedeva, L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost. *The Cryosphere*. 2019, 13, 1635-1659.

11. The North of the Far East / Ed. by N.A.Shilo. Nauka: Moscow, Russia, 1970; 487 p. (In Russian)

12. Surface water resources of the USSR. V. 19. Northeast. Gidrometeoizdat: Leningrad, Russia, 1969; 282 p. (In Russian)

13. Ushakov, M.V. On the ongoing crisis of the stationary hydrological network in the North-East of Russia. In *The role of stationary observations in modern geographical research*. 2022. PGI FEBRAS: Vladivostok, Russia, 159-161. (In Russian)

14. All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center. Available online: <http://meteo.ru/data/> (accessed on 13 November 2021). (In Russian)

15. Shelutko, V.A. Numerical methods in hydrology. Gidrometeoizdat: Leningrad, Russia, 1991; 238 p. (In Russian)

16. Hurst, H. E. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1951, 116, 770-808.

17. Shelutko, V.A. Statistical models and methods for studying long-term runoff fluctuations. Gidrometeoizdat: Leningrad, Russia, 1984; 160 p. (In Russian)

18. Ushakov, M.V. Scheme for calculating the resources of river waters in Primagadanya in a changing climate. *Use and protection of natural resources in Russia*. 2018, 3, 76-79. (In Russian)

19. Bulgakov, K.Yu.; Meleshko, V.P.; Shpeerov, B.E. On the sensitivity of the climate to doubling the concentration of CO₂ in the atmosphere. *Proceedings of the Main Geophysical Observatory n.a. A.I. Voeikov*. 2007, 556, 2-28. (In Russian)

20. Dodd, E.M.; Merchant, C.J.; Rayner, N.A.; Morice, C.P. An investigation into the impact of using various techniques to estimate Arctic surface air temperature anomalies. *Journal of Climate*. 2015, 28 (5), 1743-1763.

21. Ushakov, M.V. Climatic response of the minimum summer-autumn runoff of the rivers of the northern Okhotsk region. *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Geography. Geology*. 2019, 5(71) (1), 238-246. (In Russian)

22. Ushakov, M.V. The nature of climatic changes in the intra-annual distribution of runoff in the Upper Kolyma. *Society, environment, development*. 2021, 2, 86-89. (In Russian)

23. Sokolov, O.V.; Ushakov, M.V. Accounting for climate change when forecasting water inflow into the Kolyma reservoir for May. *Proceedings of the Main Geophysical Observatory n.a. A.I. Voeikov*. 2012, 566, 289-297. (In Russian)

24. Ushakov, M.V. Improving the forecast of water inflow into the Kolyma reservoir in the context of climate change. *Engineering Research*. 2016, 3, 40-44 (In Russian)

25. Ushakov, M.V. Methods of long-term forecasting of water inflow to the cascade of reservoirs on the Kolyma River for the second quarter. *Scientific notes of the Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky. Geography. Geology*. 4(70) (2), 2018, 269-280. (In Russian)

26. Ushakov, M.V. Long-term fluctuations of the annual water inflow to the cascade of reservoirs on the Kamenushka River and their prediction. *Society. Environment. Development*. 2018, 4, 139-145. (In Russian)

27. Ushakov, M.V. Inclusion of the Kolyma HPP and climate change in the hydrological regime of the river. Kolyma. *Bulletin of the Center of the North-Eastern Scientific Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2013, 2, 20-24. (In Russian)

28. Ushakov, M.V. Kolyma in conditions of non-stationarity. *Bulletin of the North-Eastern Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2018, 1, 49-55. (In Russian)

29. Ushakov, M.V. Forecasting the timing of freezing of the Kolyma River under conditions of climatic and anthropogenic changes. *Geopolitics and ecogeodynamics of regions*. 2020, 6(16) (4), 191-202. (In Russian)

30. Ushakov, M.V. The duration of the ice season on the rivers of the Tauyskaya Bay under the conditions of climatic changes. *Geopolitics and ecogeodynamics of regions*. 2022, 8 (2), 236-245. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 16.01.2023; одобрена после рецензирования 10.02.2023; принята к публикации 17.03.2023.

The article was submitted 16.01.2023; approved after reviewing 10.02.2023; accepted for publication 17.03.2023.