

Оригинальная статья

УДК 556.06(571.65)

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-106-111>



## МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ПРИТОКА ВОДЫ К КАСКАДУ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕКЕ КАМЕНУШКЕ НА НОЯБРЬ-МАРТ ПО СКОЛЬЗЯЩЕЙ РЕГРЕССИИ

М.В. Ушаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук; Магадан, Российская Федерация

<sup>1</sup>[mvilorich@narod.ru](mailto:mvilorich@narod.ru); ORCID: 0000-0003-1731-7541

**Аннотация.** Цель исследований – разработать методику прогноза притока воды к каскаду водохранилищ реки Каменушки на холодную часть года. В исследованиях применялись спектральный анализ и низкочастотная фильтрация временных рядов. Многолетние колебания притока воды содержат положительный тренд и 12-летнюю цикличность. Была принята гипотеза о соответствии колебаний исследуемой характеристики модели сложной цепи Маркова. Чтобы учесть климатическую нестационарность, был использован метод скользящей регрессии. Предикторами послужили приток за октябрь и Тропический Северо-Атлантический индекс атмосферной циркуляции. Полученная удовлетворительная методика долгосрочного прогноза притока воды к каскаду водохранилищ р. Каменушки на ноябрь-март имеет оправдываемость прогнозов 78,7%, отношение среднеквадратичной ошибки прогнозов к стандартному отклонению прогнозируемого ряда – 0,67. Предлагаемые прогнозы будут полезны при регулировании стока р. Каменушки.

**Ключевые слова:** прогноз притока воды, климатический тренд, скользящая регрессия, межгодовая изменчивость, река Каменушка

**Формат цитирования:** Ушаков М.В. Методика прогноза притока воды к каскаду водохранилищ на реке Каменушке на ноябрь-март по скользящей регрессии. Природообустройство. 2026;Т.19(1):106-111. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-106-111>

Original article

## METHODOLOGY FOR PREDICTING WATER INFLOW TO THE CASCADE OF RESERVOIRS ON THE KAMENUSHKA RIVER FOR NOVEMBER-MARCH BY SLIDING REGRESSION

M.V. Ushakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>North-East Interdisciplinary Scientific Research Institututen.a.n. N.A. Shilo, Far East Branch, Russian Academy of Sciences; Magadan, Russian Federation

<sup>1</sup>[mvilorich@narod.ru](mailto:mvilorich@narod.ru); ORCID: 0000-0003-1731-7541

**Abstract.** The goal of the work was to develop a methodology for forecasting the water inflow to the cascade of reservoirs of the Kamenushka River for the cold part of the year. The study used spectral analysis and low-frequency filtering of time series. Long-term fluctuations in water inflow contain a positive trend and a 12-year cyclicity. The hypothesis was accepted that the fluctuations of the studied characteristic correspond to the model of a complex Markov chain. In order to take into account climatic non-stationarity, the sliding regression method was used. The inflow for October and the Tropical North Atlantic Atmospheric Circulation Index served as predictors. The resulting satisfactory methodology for long-term forecasting of water inflow to the cascade of reservoirs of the Kamenushka River for November-March has a forecast accuracy of 78.7%, the ratio of the root-mean-square error of forecasts to the standard deviation of the forecast series is 0.67. The proposed forecasts will be useful in regulating the flow of the Kamenushka River.

**Keywords:** forecast of water inflow, climate trend, sliding regression, interannual variability, Kamenushka River

**Citation format:** Ushakov M.V. Methodology for predicting water inflow to the cascade of reservoirs on the Kamenushka River for November-March by sliding regression. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(1):106-111. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-1-106-111>

**Введение.** Для обеспечения г. Магадана питьевой водой на р. Каменушке работают два водохранилища с общей водосборной площадью 70,7 км<sup>2</sup>. В отдельные маловодные годы по причине дефицита воды в зимне-весенний период вводятся ограничения в ее подаче городу. Для более эффективного регулирования речного стока необходимы долгосрочные гидрологические прогнозы притока воды на различные календарные периоды года [1].

**Цель исследований:** разработать методику прогноза притока воды к каскаду водохранилищ р. Каменушки на холодную часть года (ноябрь-март).

В условиях глобального потепления климата [2-4] перед гидрологами стоит задача по учету климатических изменений в гидрологических прогнозах [5].

**Материалы и методы исследований.** Многолетние данные о притоке воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке были взяты из Фонда научно-оперативных материалов о гидрологических прогнозах Колымского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Статистические характеристики рядов притока рассчитывались методом моментов в соответствии с работой [6] (табл. 1). Внутрирядная однородность временных рядов по среднему определялась по критерию Стьюдента на уровне значимости 5%.

Многолетние данные о среднегодовой температуре воздуха имеются на официальном сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) [7]. Для отыскания предикторов использовалась база данных индексов атмосферной циркуляции, размещенной на интернет-портале Национального управления

океанических и атмосферных исследований США [8].

В работе использованы спектральный анализ [9], низкочастотная фильтрация рядов [10] и метод скользящей регрессии [11].

*Прогностическая модель и ее верификация.* Ряд притока воды на ноябрь-март неоднороден по среднему значению (табл. 1). Из данных рисунка 1 следует, что последние три десятилетия он имеет тренд на повышение (рис. 1а). Если ряд притока подвергнуть низкочастотной фильтрации путем скользящего 30-летнего осреднения, то можно наглядно увидеть, как от года к году меняется выборочная норма, рассчитанная за 30 лет (рис. 2).

Поскольку никакая хозяйственная деятельность на водосборной площади каскада водохранилищ не осуществляется, можно заключить, что увеличение зимнего стока происходит, вероятнее всего, по причине потепления климата (рис. 1б). Так, повышение температуры воздуха вызывает сокращение площади и мощности многолетнемерзлых пород, что уменьшает объем криогенной консервации влаги в почвогрунтах, тем самым увеличивая приток подземных вод в речную сеть. Для дальнейшего анализа многолетних колебаний притока воды они были представлены в отклонениях от линии тренда.

Спектральный анализ показал, что отклонения имеют 12-летнюю цикличность (рис. 3). Исходя из этого, можно принять гипотезу о соответствии колебаний отклонений модели сложной цепи Маркова [12], а значит, при отыскании предикторов для прогноза можно использовать дальние асинхронные связи притока с различными индексами атмосферной циркуляции.

При разработке прогностической модели были отысканы следующие эффективные предикторы: приток воды к каскаду водохранилищ

**Таблица 1. Статистические параметры ряда притока воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке за ноябрь-март**

**Table 1. Statistical parameters of the series of water inflow to the cascade of reservoirs on the Kamenushka River in November-March**

Длина ряда, лет <i>Series length, years</i>	Среднее, м <sup>3</sup> /с <i>Average, m<sup>3</sup>/s</i>	Среднеквадратичное отклонение, м <sup>3</sup> /с <i>Standard deviation, m<sup>3</sup>/s</i>	Коэффициент вариации <i>Coefficient Variations m<sup>3</sup>/s</i>	Отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации <i>Ratio of skewness coefficient to coefficient of variation</i>	Внутрирядная однородность по критерию Стьюдента <i>Intra-row homogeneity according to the Student's criterion</i>
62	0,51	0,23	0,46	1,5	нет

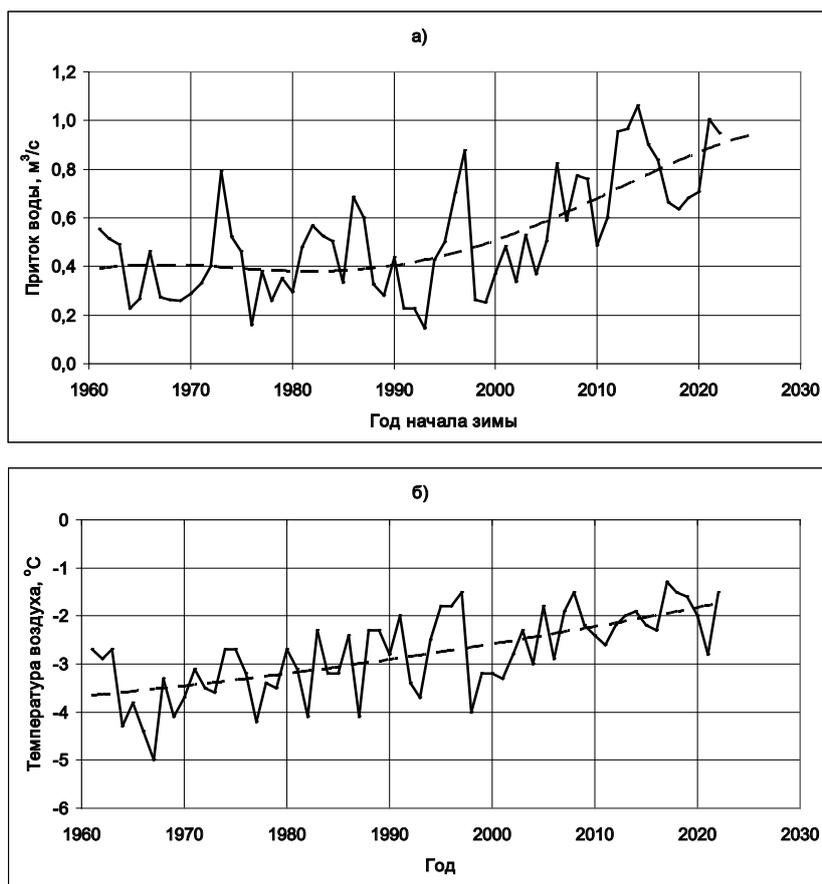


Рис. 1. Многолетние колебания притока воды к каскаду водохранилищ р. Каменушки за ноябрь-март (а) и среднегодовой температуры воздуха в г. Магадане (б)  
Пунктиром проведены линии тренда

Fig. 1. Long-term fluctuations of water inflow to the cascade of reservoirs of the Kamenushka River in November-March (a) and the average annual air temperature in Magadan (b)  
Trend lines are drawn with a dotted line

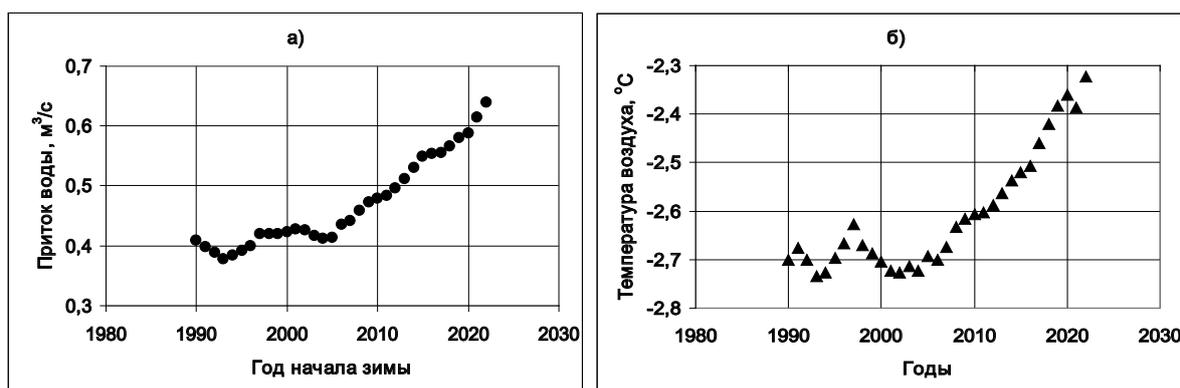


Рис. 2. Скользящие 30-летние средние притока воды к каскаду водохранилищ р. Каменушки за ноябрь-март (а) и среднегодовой температуры воздуха в г. Магадане (б)  
Fig. 2. Sliding 30-year average water inflows to the cascade of reservoirs of the Kamenushka River for November-March (a) and the average annual air temperature in Magadan (b)

за октябрь и Тропический Северо-Атлантический индекс атмосферной циркуляции (ТНА) за октябрь с временным лагом 11 лет. Октябрьский приток характеризует предзимнюю увлажненность водосбора. Индекс ТНА влияет на характер зимней погоды.

В условиях климатической нестационарности был применен метод скользящей регрессии, при котором параметры уравнения регрессии ежегодно пересчитываются по скользящей обучающей выборке. В настоящей работе оптимальная длина обучающей выборки составила 15 лет,

Таблица 2. Проверочные прогнозы притока воды к каскаду водохранилищ  
р. Каменушки на ноябрь-март (допустимая ошибка 0,16 м<sup>3</sup>/с)

Table 2. Verification forecasts of water inflow to the cascade of reservoirs  
of the Kamenushka River for November-March (permissible error 0.16 m<sup>3</sup>/s)

Год	Сводный коэффициент корреляции <i>Composite correlation coefficient</i>	Параметры уравнения			Приток, м <sup>3</sup> /с		Успешность прогноза
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	факт	прогноз	
1976	0,82	0,160	0,090	0,12	0,16	0,22	Да
1977	0,85	0,161	0,142	0,10	0,38	0,41	Да
1978	0,86	0,161	0,116	0,09	0,26	0,28	Да
1979	0,86	0,161	0,111	0,09	0,35	0,27	Да
1980	0,84	0,159	0,121	0,10	0,29	0,30	Да
1981	0,86	0,161	0,047	0,10	0,48	0,45	Да
1982	0,92	0,174	0,079	0,07	0,57	0,68	Да
1983	0,93	0,160	0,047	0,10	0,53	0,41	Да
1984	0,94	0,162	0,098	0,11	0,50	0,38	Да
1985	0,92	0,159	0,016	0,12	0,33	0,36	Да
1986	0,92	0,162	0,049	0,12	0,69	0,83	Да
1987	0,92	0,142	0,105	0,16	0,60	0,85	Нет
1988	0,87	0,116	0,019	0,19	0,33	0,42	Да
1989	0,87	0,104	0,055	0,20	0,28	0,35	Да
1990	0,87	0,105	0,084	0,19	0,44	0,44	Да
1991	0,87	0,105	0,072	0,18	0,23	0,30	Да
1992	0,87	0,100	0,098	0,19	0,23	0,30	Да
1993	0,88	0,104	0,116	0,18	0,15	0,29	Да
1994	0,87	0,111	0,057	0,16	0,43	0,45	Да
1995	0,88	0,115	0,083	0,15	0,50	0,36	Да
1996	0,86	0,116	0,182	0,14	0,70	0,41	Нет
1997	0,78	0,116	0,191	0,15	0,88	0,61	Нет
1998	0,79	0,138	0,240	0,11	0,26	0,30	Да
1999	0,82	0,141	0,269	0,09	0,25	0,28	Да
2000	0,83	0,143	0,254	0,08	0,37	0,29	Да
2001	0,84	0,139	0,275	0,10	0,48	0,27	Нет
2002	0,80	0,155	0,229	0,09	0,34	0,34	Да
2003	0,87	0,228	0,214	-0,03	0,53	0,49	Да
2004	0,89	0,233	0,249	-0,03	0,37	0,51	Да
2005	0,87	0,225	0,228	-0,02	0,50	0,44	Да
2006	0,88	0,233	0,218	-0,02	0,82	0,41	Нет
2007	0,78	0,238	0,055	0,00	0,59	0,45	Да
2008	0,74	0,230	0,033	0,03	0,77	0,58	Нет
2009	0,68	0,224	0,037	0,06	0,76	0,47	Нет
2010	0,67	0,220	0,097	0,09	0,49	0,62	Да
2011	0,67	0,226	0,149	0,05	0,60	0,62	Да
2012	0,70	0,222	0,199	0,04	0,96	0,73	Нет
2013	0,70	0,200	0,310	0,08	0,97	0,62	Нет
2014	0,82	0,170	0,511	0,15	1,06	1,13	Да
2015	0,84	0,163	0,499	0,17	0,90	0,92	Да
2016	0,85	0,128	0,511	0,25	0,84	0,98	Да
2017	0,89	0,032	0,619	0,45	0,67	0,95	Нет
2018	0,82	0,096	0,461	0,34	0,64	0,56	Да
2019	0,81	0,079	0,465	0,38	0,68	0,82	Да
2020	0,73	0,067	0,403	0,43	0,71	0,81	Да
2021	0,76	0,082	0,344	0,42	1,01	0,92	Да
2022	0,79	0,042	0,449	0,47	0,95	0,88	Да

и прогностическое уравнение выглядит следующим образом:

$$Q_i^{XI-III} = a_i Q_i^X + b_i A_{i-11} + c_i,$$

где  $i$  – год;  $Q_i^{XI-III}$  – приток воды к каскаду водохранилищ за ноябрь-март, м<sup>3</sup>/с;  $Q_i^X$  – приток воды к каскаду водохранилищ за октябрь, м<sup>3</sup>/с;  $A_{i-11}$  – индекс TNA;  $a_i, b_i, c_i$  – параметры уравнения регрессии.

Проверочные прогнозы отражены в таблице 2. Оправдываемость проверочных прогнозов составила 78,7%, отношение среднеквадратичной ошибки прогнозов к стандартному отклонению прогнозируемого ряда – 0,67. В соответствии с работой [13] качество методик является удовлетворительным.

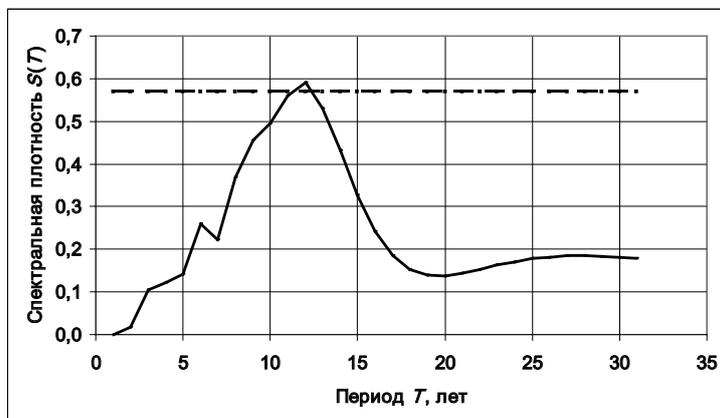


Рис. 3. Спектрограмма многолетних колебаний отклонений притока воды от линии тренда (пунктиром проведен доверительный уровень 5%)

Fig. 3. Spectrogram of long-term fluctuations in water inflow deviations from the trend line. The dotted line shows the confidence level of 5%

### Выводы

В результате исследований установлено, что многолетние колебания притока воды к каскаду водохранилищ р. Каменушки на ноябрь-март содержат тренд на повышение и 12-летний цикл.

Получена удовлетворительная методика для долгосрочного прогноза притока на холодную

часть года. Предикторами послужили приток за октябрь и Тропический Северо-Атлантический индекс атмосферной циркуляции за октябрь с лагом 11 лет.

Результаты проведенных исследований будут полезны при эксплуатации водных ресурсов р. Каменушки.

### Список использованных источников

1. Резниковский А.Ш., Александровский А.Ю., Атурин В.В., Гладкова С.П., Костина С.Г. Гидрологические основы гидроэнергетики. М.: Энергия, 1979. 232 с.
2. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO-No. 1167. Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 2016. 26 p.
3. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 1. С. 36-79. EDN: JEMWYL
4. Ушаков М.В. Климатические изменения гидрологического режима рек Северо-Востока России // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2023. Т. 9 (75). № 1. С. 112-133. EDN: BPZYOX
5. 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. EDN: JZPLJD
6. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Минстрой России, 2023. 103 с.

### References

1. Reznikovskiy A.Sh., Aleksandrovskiy A.Yu., Aturin V.V., Gladkova S.P., Kostina S.G. Hydrological foundations of hydropower engineering [Gidrologicheskie osnovy gidrojenergetiki]. Moscow, Energiya Publ. [Izd-vo Energiya], 1979. 232 p.
2. WMO statement on the status of the global climate in 2015. WMO-No. 1167. Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 2016. 26 p.
3. Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. Impact of climate change on the annual and maximum flow of rivers in Russia: assessment and forecast]. Fundamental and Applied Climatology. 2021. Vol. 7, no. 1. P. 36-79. EDN: JEMWYL
4. Ushakov M.V. Climatic changes in the hydrological regime of rivers in the North-East of Russia. Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology. 2023. Vol. 9 (75). No. 1. P. 112-133. EDN: BPZYOX
5. Ushakov M.V. Hydrological calculations and forecasts for the rivers of the Upper Kolyma and the Northern Priokhotomorie in the context of climate change. Pacific geography. 2023. No. 4. P. 52-63. EDN: JZPLJD
6. Code of Practice 529.1325800.2023. Definition of the Main Calculated Hydrological Characteristics [Svod

7. Интернет-портал Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Мирового центра данных. [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 10.01.2025)

8. Интернет-портал Национального управления океанических и атмосферных исследований США. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices/> (дата обращения: 14.01.2025)

9. Шелутко В.А. Численные методы в гидрологии: Учебное пособие. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 239 с. EDN: XXGCCD

10. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 424 с.

11. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учебное пособие. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.

12. Шелутко В.А. Статистические модели и методы исследования многолетних колебаний стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 160 с.

13. Наставление по службе прогнозов. Разд. 3. Ч. I. Служба гидрологических прогнозов. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 193 с.

#### Информация об авторе

**Михаил Вилорьевич Ушаков**, канд. геогр. наук; старший научный сотрудник СВКНИИ ДВО РАН; ORCID: 0000-0003-1731-7541; PIIИЦ AuthorID68167; mvilorich@narod.ru

Поступила в редакцию / Received 21.05.2025

Поступила после рецензирования / Received 21.11.2025

Принята к публикации / Accepted 27.11.2025

pravil 529.1325800.2023. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik]. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2023. 103 p.

7. Internet portal of Russian Research Institute of Hydro-meteorological Information – World Data Center. [Electronic resource]. URL: <http://meteo.ru/data/> (10.01.2025).

8. Internet portal of National Oceanic and Atmospheric Administration USA. [Electronic resource]. URL: <http://www.cdc.noaa.gov/ClimateIndices/> (14.01.2025).

9. Shelutko V.A. Numerical methods in hydrology. Textbook. Leningrad: Gidrometeoizdat. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 1991. 239 p. EDN: XXGCCD

10. Rozhdestvensky A.V., Chebotarev A.I. Statistical methods in hydrology Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. 1974. 424 p.

11. Lukashin Yu.P. Adaptive methods of short-term forecasting of time series Moscow: Finance and Statistics Publ., 2003. 416 p.

12. Shelutko V.A. Statistical models and methods for studying long-term flow fluctuations. Leningrad, Gidrometeoizda Publ., 1984. 160 p.

13. Manual for the Forecast Service. Section 3. Part I. Hydrological Forecast Service. Forecasts of the Land Water Regime. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. 1962. 193 p.

#### About the Authors

**Mikhail V. Ushakov**, CSs (Geography): ORCID: 0000-0003-1731-7541, PIIИЦ AuthorID68167; mvilorich@narod.ru