

МНОГОЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ ГОДОВОГО ПРИТОКА ВОДЫ К КАСКАДУ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕКЕ КАМЕНУШКЕ И ИХ ПРЕДВЫЧИСЛЕНИЕ

На Северо-Востоке России возле Магадана функционирует каскад из двух водохранилищ на р. Каменушке для обеспечения города питьевой водой. Для более эффективного регулирования речного стока необходимы долгосрочные прогнозы притока воды к водохранилищам. В работе ставилась цель разработать метод предвычисления многолетних колебаний суммарного притока воды к каскаду водохранилищ. Исходными данными послужили данные многолетних наблюдений за стоком на гидрологических постах Росгидромета. Из-за глобальных климатических изменений межгодовые колебания притока имеют тренд на повышение, который описывается полиномом третьей степени. После элиминации тренда спектральный анализ выявил наличие статистически значимых циклов продолжительностью 6, 10, 11 лет. На основе этого было получено уравнение для предвычисления многолетних колебаний притока в отклонениях от тренда. Для прогноза годового притока необходимо ежегодно уточнять параметры уравнения линии тренда. Полученный метод является удовлетворительным: отношение среднеквадратичной ошибки прогнозов к стандартному отклонению исходного ряда составило 0,73, оправдываемость – 64,4%.

Ключевые слова:

водохранилище, прогноз, речной сток, спектральный анализ, тренд.

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.

© Ушаков Михаил Вилорьевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН), Магадан; e-mail: mvilorich@narod.ru

Для обеспечения г. Магадан питьевой водой используется каскад из двух водохранилищ на р. Каменушке (табл. 1). Однако в отдельные годы Магадан испытывает нехватку питьевой воды [5].

Для более эффективного регулирования речного стока необходимы долгосрочные прогнозы притока воды к водохранилищам [9; 11].

В работе ставится цель разработать метод предвычисления многолетних колебаний суммарного притока воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке. Задача осложняется тем, что со второй половины

XX века на планете идет процесс глобального потепления климата [4; 10; 25], который отражается и на режиме стока рек [22; 23].

Разработкам методов прогноза годового стока рек на Северо-Востоке России посвящены работы [16; 24]. В работе [24] получен физико-статистический метод прогноза годового притока воды к Колымскому и Усть-Среднеканскому водохранилищам на основе уравнений множественной регрессии, где в качестве предикторов выступили показатели запасов воды в снежном покрове в декабре и индексы

Таблица 1

Характеристики водохранилищ на р. Каменушке

Водоохранилище	Площадь водосбора, км ³	Площадь водного зеркала при НПУ, км ²	Объем воды при НПУ, млн м ³
Водоохранилище № 2	63,5	1,72	17,2
Водоохранилище № 1	7,2*	0,69	3,5
Суммарно по каскаду	70,7	2,41	20,7

* Промежуточная водосборная площадь между плотинами водохранилищ. НПУ – нормальный подпорный уровень.

атмосферной циркуляции: Южного колебания и Арктической осцилляции. В [16] на основе гармонической функции разработан статистический метод предвычисления многолетних колебаний годового стока р. Анадырь.

Магадан находится на побережье Охотского моря. Характерной особенностью бассейна р. Каменушки, где формируется речной сток, является холодный климат [14], прерывистое распространение многолетней мерзлоты [3]. Лесной ландшафт на горных хребтах и нагорьях сменяется тундрой, каменистыми пустынями (гольцами). Средняя годовая температура воздуха ниже нуля [8]. Наиболее холодным является январь, самым теплым – июль. Осадки в течение всего года определяются циклонической деятельностью, внутримассовые осадки, обусловленные сильным прогревом, вносят незначительный вклад в годовую сумму. Внутригодовое распределение стока отличается значительной неравномерностью. В теплую часть года (май–октябрь) протекает основная масса воды (94–99%) [12]. В зимние месяцы сток незначителен.

В период половодья проходит в среднем 35–55% суммарного стока за год. Сток формируется главным образом за счет снеготаяния, доля дождевых вод невелика, подземный сток практически отсутствует. Гидрографы половодья характеризуются зачатую пилообразной формой. Волна половодья нередко сливается с последующими дождевыми паводками. Дождевые паводки проходят в период середина июня – сентябрь, реже – в октябре. Как правило, в среднем за год на-

блюдается от одного-двух до трех-пяти паводков.

В летне-осенний период в связи с оттаиванием деятельного слоя доля подземного стока начинает увеличиваться. Наименьшие расходы воды за период открытого русла могут наблюдаться в любой летний месяц, преимущественно во второй половине лета и перед появлением на реке осенних ледовых явлений. Продолжительность летних меженных периодов, как правило, незначительна. В меженные периоды реки в основном питаются подземными водами.

Зимняя межень наблюдается со второй половины октября до начала мая. В этот период реки питаются исключительно грунтовыми водами.

Материалы и методы исследования

Для разработки метода прогноза суммарного годового притока воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке необходимо рассчитать погодичные величины притока, используя данные многолетних наблюдений гидрологических постов за речным стоком. В данной работе годовой приток выражен в м³/с. При помощи простого преобразования от м³/с можно всегда перейти к объему притока (км³).

На р. Каменушке выше водохранилищ многолетние наблюдения за стоком велись на двух постах Колымского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (табл. 2). Методом гидрологической аналогии все ряды были приведены к многолетнему периоду 1958–2016 гг. Ряды среднегодовых расходов воды были сформированы по данным [6]

Таблица 2

Параметры кривых обеспеченностей годового стока р. Каменушки за 1958-2016 гг. и расчетного ряда суммарного притока к каскаду водохранилищ

Река – пункт	Площадь водосбора, км ²	Среднемноголетний годовой расход (приток), м ³ /с	σ , м ³ /с	C_v	C_s/C_v
р. Каменушка – в 8 км от устья	40,3	0,82	0,23	0,29	1
р. Каменушка – в 3,3 км выше плотины	58,8	1,07	0,36	0,34	0,5
Суммарный приток к каскаду водохранилищ	70,7	1,28	0,44	0,34	0,5

Примечания: σ – среднеквадратичное отклонение; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии.

и гидрологических ежегодников Государственного водного кадастра.

Определение параметров кривых обеспеченности рядов годового стока производилось методом моментов [15]. Все ряды однородны по дисперсии (критерий Фишера), однако имеются тренды на увеличение стока (критерий Стьюдента). В работе [17] показано, что увеличение стока связано с современными изменениями климата.

В качестве опорного гидрологического поста взят створ р. Каменушка – в 3,3 км выше плотины с площадью водосбора 58,8 км². Водосборная площадь каскада водохранилищ в 1,20 раза больше, чем в створе опорного поста. Поэтому члены многолетнего ряда суммарного притока воды к каскаду вычислялся по простой формуле

$$P_i = 1,20 Q_i, \quad (1)$$

где Q_i – среднегодовой расход воды на Каменушке в 3,3 км выше плотины в год i , м³/с.

Ряд притока имеет тренд на повышение, который хорошо аппроксимируется полиномом третьей степени (рис. 1).

Для исследования частотной структуры многолетних колебаний рассматриваемого ряд был проведен спектральный анализ. Спектральная функция $S(T)$ рассчитывалась с использованием весовой функции Хэмминга по формуле [21]

$$S(T) = \frac{1}{2\pi} + \sum_{\tau=1}^m \frac{\left(0,54 + 0,46 \cos \frac{\pi\tau}{m}\right) r(\tau) \cos \frac{2\pi\tau}{T}}{\pi}, \quad (2)$$

где T – период ($T = 1, 2, \dots, m$ лет); τ – сдвиг по времени с дискретностью 1 год; m – максимальный сдвиг по τ ($m = n/2$ лет); n – длина ряда; $r(\tau)$ – ординаты автокорреляционной функции.

Перед проведением спектрального анализа ряд притока был представлен в отклонениях от тренда

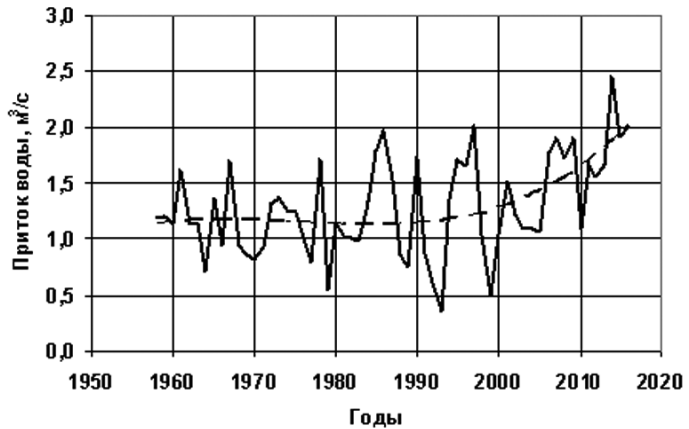


Рис. 1. Суммарный приток воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке (пунктиром проведена линия тренда).

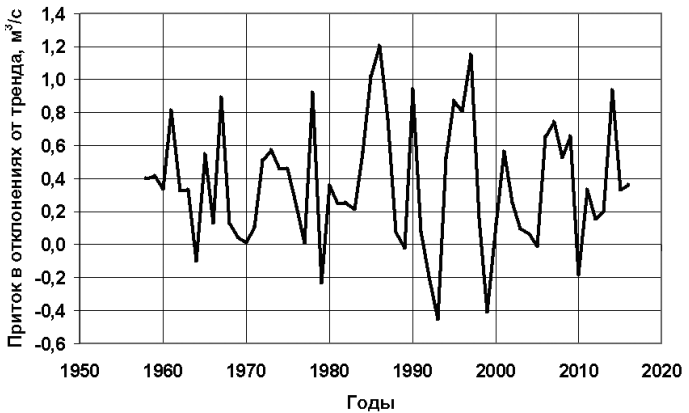


Рис. 2. Суммарный приток воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке в отклонениях от линии тренда.

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

После элиминации тренда ряд принял стационарный вид (рис. 2), а это значит, что линия тренда была удачно аппроксимирована.

На основе анализа многолетних колебаний годового притока можно разработать статистический метод их предвычисления.

Модель предвычисления и ее верификация

Спектральный анализ ряда отклонений годового притока от линии тренда выявил статистически значимые циклы продолжительностью 6, 10, 11 лет (рис. 3).

С вероятностью 95% можно утверждать, что многолетние колебания годового

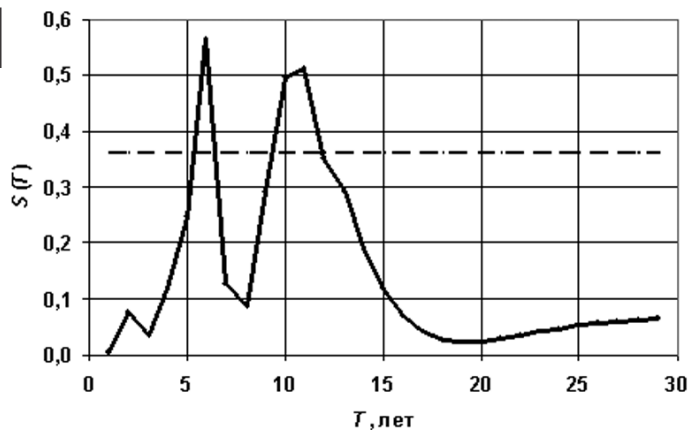


Рис. 3. Спектрограмма колебаний суммарного притока воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке (пунктиром проведена достоверная граница при уровне значимости 5%).

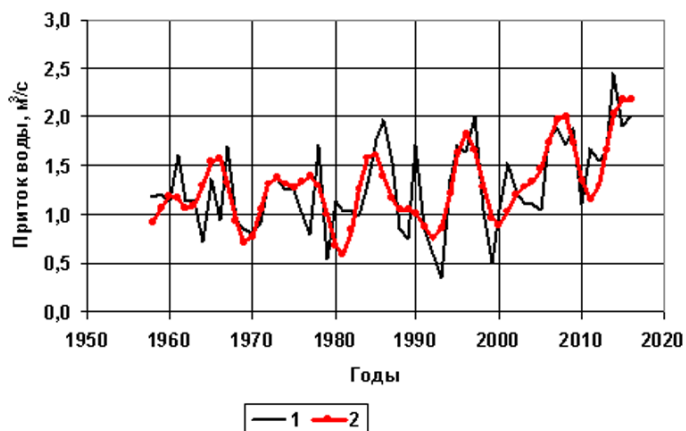


Рис. 4. Суммарный годовой приток воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке (1) и его предвычисленные значения (2).

го притока соответствуют статистической модели сложной цепи Маркова [20].

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

$$\Delta P_i^* = 0,218 \cos(2\pi(i-1954)/6) + 0,200 \cos(2\pi(i-1956)/10) + 0,200 \cos(2\pi(i-1952)/11) + 0,36, \quad (4)$$

Аналогичный подход был успешно использован в работах [13; 16; 18].

Таким образом, получен метод предвычисления многолетних колебаний притока в отклонениях от тренда. Учитывая (3),

прогнозное значение притока на год i будет иметь следующий вид

$$P_i^* = ai^3 + bi^2 + ci + d + \Delta P_i^*. \quad (5)$$

Проверочные прогнозы показали неплохую сходимость фактических и предвычисленных значений притока (рис. 4, табл. 3). Допустимая ошибка прогноза рассчитывалась по известной формуле [7]

$$\sigma_{\text{дон}} = 0,674\sigma.$$

Отношение среднеквадратичной ошибки прогнозов к стандартному отклонению исходного ряда составило 0,73, оправдываемость – 64,4%. В соответствии с [7] данный метод является удовлетворительным.

Разработаны различные сценарии климатических изменений в XXI веке, например работы [1; 2; 4; 10; 19]. Поэтому существует неопределенность, как будет вести себя речной сток ближайшее десятилетие в рассматриваемом районе. Для предвычисления колебаний суммарного годового притока к каскаду водохранилищ предлагается ежегодно уточнять параметры тренда в уравнении (5). В табличном редакторе Microsoft Excel это делается легко и быстро.

Заключение

На основе анализа многолетних колебаний годового притока воды к каскаду водохранилищ на р. Каменушке впервые разработан представляющий удовлетворительным метод предвычисления многолетних колебаний этой характеристики. Для составления этих прогнозов необходимо ежегодно пересчитывать коэффициенты в уравнении линии климатического тренда.

Данные прогнозы позволят МУП «Водоканал» заблаговременно подготовиться к маловодным периодам и выбирать оптимальный режим регулирования стока р. Каменушки.

**Проверочные прогнозы суммарного годового притока воды к каскаду водохранилищ
на р. Каменушке (допустимая ошибка 0,30 м³/с)**

Годы	Приток воды, м ³ /с		Ошибка прогноза, м ³ /с	Оправдываемость
	фактический	по прогнозу		
1958	1,18	0,91	-0,27	Оправдался
1959	1,2	1,07	-0,13	Оправдался
1960	1,13	1,19	0,06	Оправдался
1961	1,61	1,16	-0,45	Не оправдался
1962	1,13	1,07	-0,06	Оправдался
1963	1,14	1,10	-0,04	Оправдался
1964	0,71	1,30	0,59	Не оправдался
1965	1,36	1,53	0,17	Оправдался
1966	0,94	1,57	0,63	Не оправдался
1967	1,7	1,32	-0,38	Не оправдался
1968	0,94	0,94	0,00	Оправдался
1969	0,85	0,70	-0,15	Оправдался
1970	0,82	0,77	-0,05	Оправдался
1971	0,91	1,05	0,14	Оправдался
1972	1,31	1,31	0,00	Оправдался
1973	1,37	1,38	0,01	Оправдался
1974	1,25	1,31	0,06	Оправдался
1975	1,25	1,27	0,02	Оправдался
1976	1,02	1,33	0,31	Не оправдался
1977	0,79	1,39	0,60	Не оправдался
1978	1,7	1,29	-0,41	Не оправдался
1979	0,54	1,00	0,46	Не оправдался
1980	1,13	0,68	-0,45	Не оправдался
1981	1,02	0,59	-0,43	Не оправдался
1982	1,02	0,83	-0,19	Оправдался
1983	0,98	1,26	0,28	Оправдался
1984	1,32	1,58	0,26	Оправдался
1985	1,78	1,60	-0,18	Оправдался
1986	1,97	1,39	-0,58	Не оправдался
1987	1,53	1,16	-0,37	Не оправдался

Годы	Приток воды, м ³ /с		Ошибка прогноза, м ³ /с	Оправдываемость
	фактический	по прогнозу		
1988	0,85	1,06	0,21	Оправдался
1989	0,75	1,06	0,31	Не оправдался
1990	1,72	1,01	-0,71	Не оправдался
1991	0,87	0,87	0,00	Оправдался
1992	0,6	0,76	0,16	Оправдался
1993	0,35	0,86	0,51	Не оправдался
1994	1,34	1,22	-0,12	Оправдался
1995	1,7	1,63	-0,07	Оправдался
1996	1,65	1,83	0,18	Оправдался
1997	2,01	1,67	-0,34	Не оправдался
1998	1,04	1,28	0,24	Оправдался
1999	0,49	0,96	0,47	Не оправдался
2000	1,04	0,89	-0,15	Оправдался
2001	1,51	1,03	-0,48	Не оправдался
2002	1,23	1,20	-0,03	Оправдался
2003	1,1	1,29	0,19	Оправдался
2004	1,1	1,33	0,23	Оправдался
2005	1,06	1,46	0,40	Не оправдался
2006	1,76	1,73	-0,03	Оправдался
2007	1,89	1,98	0,09	Оправдался
2008	1,72	2,01	0,29	Оправдался
2009	1,89	1,73	-0,16	Оправдался
2010	1,1	1,35	0,25	Оправдался
2011	1,67	1,16	-0,51	Не оправдался
2012	1,55	1,30	-0,25	Оправдался
2013	1,65	1,67	0,02	Оправдался
2014	2,45	2,03	-0,42	Не оправдался
2015	1,91	2,19	0,28	Оправдался
2016	2,01	2,19	0,18	Оправдался

- [1] Бортковский Р.С., Егоров Б.Н., Катцов В.М., Павлова Т. В. Модельные оценки среднего газообмена между океаном и атмосферой в условиях современного климата и при его изменениях, ожидаемых в 21 веке // Известия РАН. Т. 43. – 2007, № 3. – С. 313–318.
- [2] Бугаков К.Ю., Мелешко В.П., Шпееров Б.Е. О чувствительности климата к удвоению концентрации CO₂ в атмосфере // Труды ГГО. – 2007, вып. 556. – С. 2–28.
- [3] Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 515 с.
- [4] Израэль Ю.А., Груза Г.В., Катцов В.М., Мелешко В.П. Изменение глобального климата. Роль антропогенных воздействий // Метеорология и гидрология. – 2001, № 5. – С. 5–22.
- [5] Коскин С.С., Гашко В.И., Сусекова Н.Г., Мейдман В.А. Поверхностные водные ресурсы Магаданской области и проблемы их рационального использования и охраны // Тез. докл. Региональной научной конференции «Северо-Восток России: прошлое, настоящее, будущее». – Магадан: Администрация Магаданской области, 1998. – С. 238–239.
- [6] Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. I, вып. 17. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 429 с.
- [7] Наставление по службе прогнозов. Разд. 3. Ч. I. Служба гидрологических прогнозов. Прогнозы режима вод суши. – Л.: Гидрометеоздат, 1962. – 193 с.
- [8] Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер.3. Ч. 1-6. Вып. 33. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 566 с.
- [9] Нежиховский Р.А. Гидрологические расчеты и прогнозы при эксплуатации водохранилищ. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 191 с.
- [10] Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. I: Изменение климата. – М.: Росгидромет, 2008. – 277 с.
- [11] Резниковский А.Ш., Великанов, М.А., Костина И.Г. и Рубинштейн М.И. Гидрологические основы гидроэнергетики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 263 с.
- [12] Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 282 с.
- [13] Сарахунян Э.Н., Смирнов Н.П. Многолетние колебания стока Волги. – Л.: Гидрометеоздат, 1971. – 165 с.
- [14] Север Дальнего Востока / Под ред. Н.А. Шило. – М.: Наука, 1970. – 487 с.
- [15] СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 74 с.
- [16] Ушаков М.В. Нормы и изменчивость годового стока р. Анадырь // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2016, № 1. – С. 59–65.
- [17] 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.
- [18] Ушаков М.В. Статистический метод прогноза снеговой активности на юго-западе Магаданской области // Проблемы анализа риска. – 2018, № 4. – С. 60–65.
- [19] Фокин С.А., Катцов В.М. Модель общей циркуляции океана как компонент объединенной глобальной климатической модели ГГО // Метеорология и гидрология. – 2001, № 3. – С. 5–18.
- [20] Шелутко В.А. Статистические модели и методы исследования многолетних колебаний стока. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 160 с.
- [21] Шелутко В.А. Численные методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 239 с.
- [22] Gartsman V.I., Lupakov S.Yu. Effect of Climate Changes on the Maximal Runoff in the Amur Basin: Estimation Based on Dynamic–Stochastic Simulation // Water Resources. Vol. 44. – 2017, № 5. – P. 697–706.
- [23] 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. Vol. 41. – 2016, № 9. – P. 640–647.
- [24] Lobanov S. A., Ushakov M. V. The river water resources of the Magadan region and their long-term variability // Geography and natural resources. Vol. 29. – 2008, № 3. – P. 247–250.
- [25] WMO Statement on the status of the global climate in 2015. WMO-No 1167. – Geneva: Publications Board World Meteorological Organization, 2016. – 28 p.