

Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Научная статья

УДК 556.06

DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/102-111>

Н.А. Саноцкая, В.В. Мышко

САНОЦКАЯ НАДЕЖДА АЛЕКСАНДРОВНА – к.ф.-м.н., доцент кафедры водно-технических изысканий *Российского государственного гидрометеорологического университета*; доцент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии, na_san@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9272-4713>

МЫШКО ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии, vasvasmishko@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Россия

Долгосрочное прогнозирование среднемесячного стока средних арктических рек на примере р. Пур

Аннотация. В статье представлены два варианта долгосрочного прогнозирования среднемесячного стока арктических рек с использованием метода группового учета аргументов (МГУА), что позволяет определить оптимальную структуру зависимости и параметры. В качестве объекта исследования выбрана река Пур, которую можно рассматривать как типичную среднюю арктическую реку. Для проверки качества прогнозирования ряд среднемесячных расходов воды разбивается на две части: обучающую последовательность, которая используется для оценки коэффициентов по методу наименьших квадратов, и проверочную последовательность, применяемую для оценки прогнозирующей модели. Данный метод особенно ценен в случаях, когда нужен комплексный подход к планированию использования и охраны водных ресурсов, а также при проектировании мероприятий водохозяйственного назначения.

Ключевые слова: гидрологическое прогнозирование, сток воды, арктические реки

Для цитирования: Саноцкая Н.А., Мышко В.В. Долгосрочное прогнозирование среднемесячного стока средних арктических рек на примере р. Пур // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 2(55). С. 102–111.

Введение

Проблема долгосрочного прогнозирования речного стока заключается в том, что он зависит от множества факторов: Эти факторы могут включать в себя метеорологические условия, изменение климата, изменение рельефа местности, антропогенное использование водных ресурсов и другие факторы, которые могут влиять на расход воды и скорость течения реки. Кроме того, многие реки протекают через различные регионы и имеют различную географию, что делает их прогнозирование еще более сложным. Несмотря на это, с помощью современных технологий и моделей прогнозирования можно предсказывать речной сток с высокой точностью, что помогает обеспечить безопасность и эффективность использования водных ресурсов.

Сток рек можно рассматривать как обобщающий параметр, характеризующий сложную природную систему, изменение которой является многофакторным и многогранным процессом [1-11]. Исследование этого процесса имеет огромное значение для состояния и развития хозяйственной деятельности человека. Актуальность долгосрочных гидрологических прогнозов на арктических реках связана с тем, что эти реки весьма активно используются как водные пути для обеспечения труднодоступных районов.

С точки зрения системного подхода гидрологическое прогнозирование является частным вариантом общей проблемы наблюдения за состоянием динамической системы – проблемы, для решения которой необходимо иметь модели этой системы и окружающей среды,

отражающие присущие системе причинно-следственные связи, характеризующие ее изменения. Построение подобных моделей в математической форме наталкивается на значительные трудности вследствие высокой сложности реальной системы.

В статье предложен вариант долгосрочного гидрологического прогнозирования, основанный на годовой периодичности изменения стока, а также на регрессионных зависимостях среднемесячного стока от среднего расхода воды за год и за предыдущий месяц.

Материалы и методы

В [6] предложен комбинированный метод прогноза среднемесячных расходов рек основан на том, что средний расход рек за каждый месяц коррелирован с расходом как со среднегодовым, так и предыдущего месяца. Это дало возможность преобразовать указанный метод прогноза среднемесячного стока. Реализован метод, включающий два этапа: прогноз среднегодового стока при помощи выделения тренда и прогноз среднемесячных значений стока с помощью регрессионных зависимостей:

$$Q_i = f_i(Q_{\text{год}}Q_{i-1}), \quad i = \overline{1,12}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{год}}$ – значение среднегодового стока; Q_i, Q_{i-1} – средние расходы двух соседних месяцев.

Среднегодовой сток в модели (1) спрогнозирован по гармоническому тренду с помощью разложения в ряд Фурье:

$$Q_{\text{год}} = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi k}{T_1}\right) + b_2 \sin\left(\frac{2\pi k}{T_1}\right) + \dots + a_6 \cos\left(\frac{2\pi k}{T_6}\right) + b_6 \sin\left(\frac{2\pi k}{T_6}\right). \quad (2)$$

Результат спектрального анализа среднегодового стока (табл. 1) показал, что целесообразно использовать не все гармоники, а ограничиться только первыми шестью, что и представлено в формуле (2).

Прогнозирование среднемесячных расходов воды с заблаговременностью один месяц

В качестве примера средней арктической реки взята р. Пур в створе г. Уренгой. Исходные ряды наблюдений за среднемесячным и среднегодовым стоками с 1962 по 2020 г. разделены на обучающую (1962-2014 гг.) и проверочную (2015-2020 гг.) выборки.

Таблица 1

Коэффициенты и периоды гармонического тренда р. Пур в створе г. Уренгой

№	Частота	Период	Коэффициенты при косинусе	Коэффициенты при синусе
0	0,000000		10,070	0,0000
1	0,031250	32,00000	10,680	-22,0186
2	0,062500	16,00000	-109,248	30,5448
3	0,093750	10,66667	50,757	-7,5212
4	0,125000	8,00000	-54,718	-7,1171
5	0,156250	6,40000	-25,698	13,2116
6	0,187500	5,33333	18,079	23,6346
7	0,218750	4,57143	-16,628	0,3793
8	0,250000	4,00000	-19,108	-35,9826
9	0,281250	3,55556	9,813	29,0934
10	0,312500	3,20000	11,578	5,1837
11	0,343750	2,90909	21,543	2,4244
12	0,375000	2,66667	64,253	10,3482
13	0,406250	2,46154	-35,470	10,0718
14	0,437500	2,28571	-44,589	11,7744
15	0,468750	2,13333	19,642	-25,0633
16	0,500000	2,00000	-30,983	0,0000

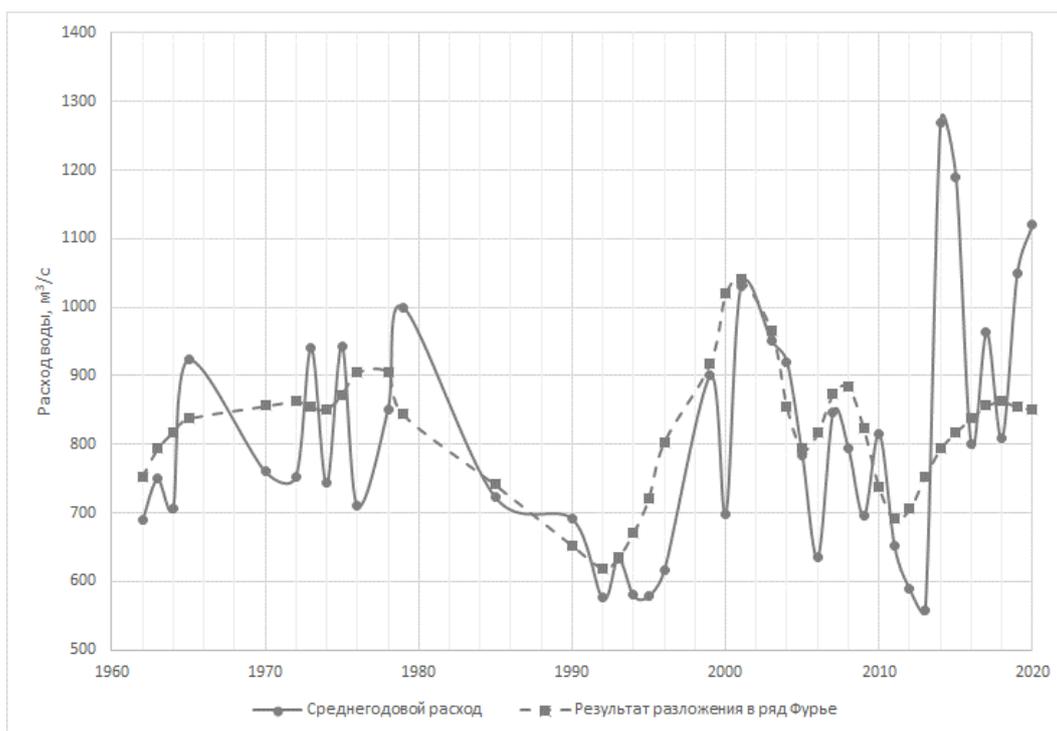


Рис. 1. Хронологический график хода среднегодовых расходов воды и гармонического тренда по шести гармоникам, р. Пур – г. Уренгой

Прогнозирование среднемесячного стока произведено по полиному оптимальной сложности. Получены 12 (для каждого месяца) регрессионных моделей:

$$Q_i = a_0^i + a_1^i Q_{i-1} + a_2^i Q_{\text{год}}, \quad i = \overline{1,12}, \quad (3)$$

где прогнозное значение $Q_{\text{год}}$ получено по (2), Q_{i-1} - фактическое значение среднемесячного расхода.

Для проверки правильности использования модели (3) использовались полиномы и более сложного вида:

$$Q_i = a_0^i + a_1^i Q_{i-1} + a_2^i Q_{\text{год}} + a_3^i Q_{i-1} Q_{\text{год}},$$

$$Q_i = a_0^i + a_1^i Q_{i-1} + a_2^i Q_{\text{год}} + a_3^i Q_{i-1} Q_{\text{год}} + a_4^i Q_i^2,$$

$$Q_i = a_0^i + a_1^i Q_{i-1} + a_2^i Q_{\text{год}} + a_3^i Q_{i-1} Q_{\text{год}} + a_4^i Q_{\text{год}}^2,$$

$$Q_i = a_0^i + a_1^i Q_{i-1} + a_2^i Q_{\text{год}} + a_3^i Q_{i-1} Q_{\text{год}} + a_4^i Q_{i-1}^2 + a_5^i Q_{\text{год}}^2,$$

$$Q_i = a_0^i + a_1^i Q_{i-1} + a_2^i Q_{\text{год}} + a_3^i Q_{i-1} Q_{\text{год}} + a_4^i Q_{i-1}^2 Q_{\text{год}} + a_5^i Q_{\text{год}}^2,$$

$$Q_i = a_0^i + a_1^i Q_{i-1} + a_2^i Q_{\text{год}} + a_3^i Q_{i-1} Q_{\text{год}} + a_4^i Q_{i-1}^2 + a_5^i Q_{i-1} Q_{\text{год}}^2.$$

В результате получено, что вышеперечисленные модели дают меньшую точность прогнозирования среднемесячного расхода по сравнению с (3) при значительном увеличении количества вычислений. Модель (3) является полиномом оптимальной сложности (табл. 2, 3, рис. 2). Таблица 2 позволяет восстановить вычисления прогнозных значений среднемесячных расходов воды, представленных в табл. 3. Для оценки качества прогнозирования, то есть для анализа табл. 3, вводится среднеквадратическая погрешность прогноза.

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнения модели (3), построенные по обучающим данным за период наблюдений с 1962 по 2014 г.

Коэффициент	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a_0	-9,82	-9,86	41,08	115,2	598,9	719,5	-506,6	-199,2	-1,02	-128,2	-8,38	-14,27
a_1	0,06	0,05	-0,08	-0,12	-1,10	3,98	1,53	1,00	-0,02	0,57	0,29	0,08
a_2	0,67	0,74	0,80	0,96	5,08	-0,75	0,16	0,12	1,09	0,51	0,45	0,70

Таблица 3

Среднемесячные расходы воды и результаты прогнозирования по модели (3) на проверочной выборке данных за период 2015-2020 гг.

Месяц	2015		2016		2017		2018		2019		2020	
	факт	прогн										
1	759	299	583	591	286	301	539	474	392	382	931	362
2	601	593	464	465	272	245	450	433	331	320	737	723
3	513	511	372	400	265	245	427	389	263	293	573	620
4	539	513	367	375	277	270	367	424	244	269	886	566
5	3020	2440	1800	1547	549	1070	461	1520	1100	906	3240	4169
6	2970	1680	2530	2680	3460	3680	3160	3780	2940	3270	1570	1650
7	1130	1210	940	1170	1820	1350	1290	1310	1290	1260	1260	1040
8	965	744	521	741	1070	866	712	808	752	801	879	794
9	963	1030	571	548	1140	1150	657	754	1063	799	914	937
10	1020	821	535	633	970	931	651	691	1318	893	813	815
11	969	688	538	476	796	677	562	535	1563	832	936	605
12	823	725	389	427	646	607	453	445	1288	1141	719	704

Среднеквадратическая ошибка прогноза рассчитана по формуле

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^m (Q_i - Q_{i\text{пр}})^2}{\sum_{i=1}^m Q_i^2} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где Q_i и $Q_{i\text{пр}}$ – фактическое и прогнозное значения расходов воды; m – число значений в проверочной выборке данных. Согласно формуле (4) средняя квадратическая ошибка прогноза (табл. 3) составляет 9,7 % при заблаговременности один месяц.

Для визуализации данных табл. 3, на рис. 2 представлен график с фактическими и прогнозными значениями среднемесячных расходов воды. В целом видно хорошее соответствие указанных значений. Однако отмечено достаточное большое расхождение с сентября 2019 г. по январь 2020 г. По-видимому, это связано с аномальными метеорологическими условиями указанного периода. Данный вопрос требует дополнительного исследования.

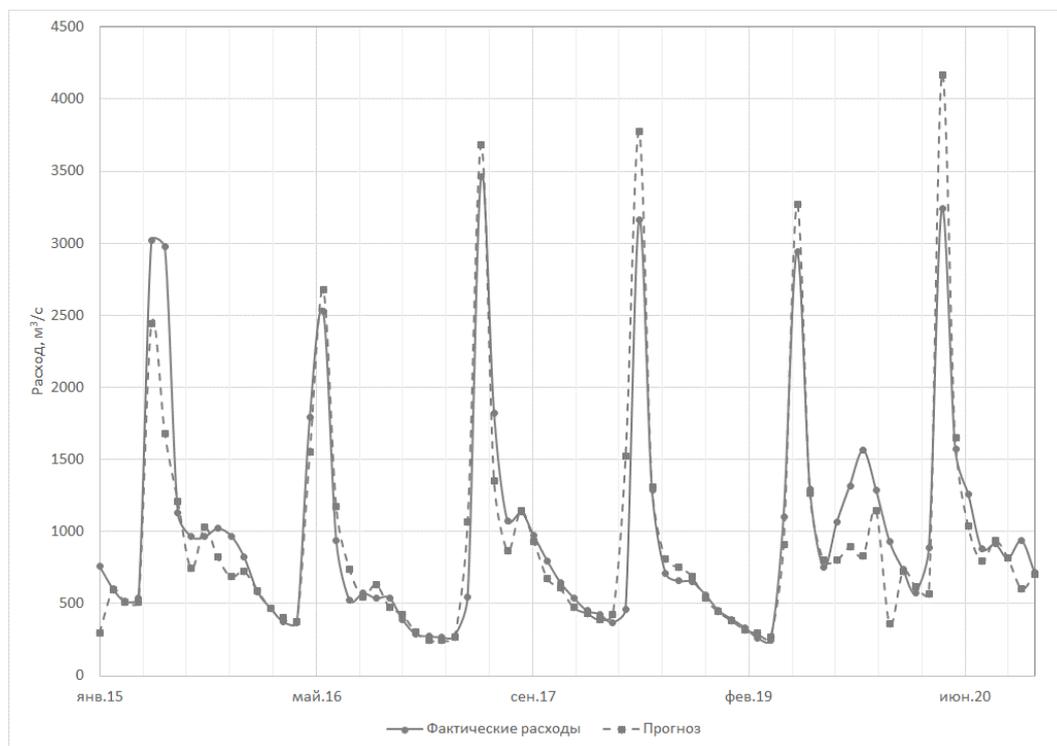


Рис. 2. График хода фактических среднемесячных расходов воды и рассчитанных по прогнозной модели (3)

Прогнозирование среднемесячных расходов воды с заблаговременностью шесть лет

Алгоритм прогнозирования можно представить в виде определенной последовательности действий.

1. По каждой выборке обучающих данных (среднегодовые и среднемесячные расходы воды) выполняется разложение в ряд Фурье.
2. По полученным данным (п. 1) строятся 12 регрессионных моделей вида (3):

$$Q_i = a_0^i + a_1^i Q_{i-1} + a_2^i Q_{\text{год}}, \quad i = \overline{1,12}, \quad (5)$$

где значения $Q_{\text{год}}$ и Q_{i-1} получены по разложению в гармонический ряд.

3. За каждый месяц производится прогноз значений стока по разложению в ряд Фурье по шести гармоникам на следующие шесть лет.
4. Исходя из данных п. 3 и модели из п. 4 прогнозируются значения среднемесячного стока на шесть лет вперед.
5. Оценивается среднеквадратическая ошибка прогноза по формуле (4).

Принципиальной разницей между моделями (3) и (5) является то, что в модели (3) среднемесячные расходы Q_{i-1} используются фактические, в модели (5) – спрогнозированные по разложению в гармонический ряд.

На основе предложенного алгоритма построен прогноз стока на 72 месяца (с 2015 по 2020 г.) по р. Пур в створе г. Уренгой.

Для исходных рядов обучающих данных (среднемесячных и среднегодовых расходов воды за период наблюдений 1962–2014 гг.) проведен спектральный анализ. Для примера коэффициенты разложения в гармонический ряд за январь представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты спектрального анализа по обучающей выборке (1962-2014 гг.), январь

№	Частота	Период	Коэффициент при косинусе	Коэффициент при синусе	Периодограмма	Плотность	Вес Хэмминга
0	0,000000		0,0000	0,0000	0,00	12414,47	0,035714
1	0,020000	50,00000	24,5541	7,7333	16567,72	25294,15	0,241071
2	0,040000	25,00000	-44,1414	-23,0294	61970,45	49143,67	0,446429
3	0,060000	16,66667	39,7278	32,7500	66271,57	55439,35	0,241071
4	0,080000	12,50000	25,2873	-32,3980	42226,95	38645,79	0,035714
5	0,100000	10,00000	12,5232	-1,8578	4007,05	19214,32	
6	0,120000	8,33333	-24,2228	11,3586	17894,04	14331,26	
7	0,140000	7,14286	-21,7160	-12,7042	15824,55	12397,10	
8	0,160000	6,25000	3,0137	-7,1621	1509,45	9036,64	
9	0,180000	5,55556	18,9989	14,5703	14331,32	10398,71	
10	0,200000	5,00000	-22,3168	-3,2286	12711,61	9452,48	
11	0,220000	4,54545	1,0217	-2,6797	205,61	5452,50	
12	0,240000	4,16667	4,3628	15,0528	6140,56	5298,09	
13	0,260000	3,84615	-4,4627	-17,9093	8516,45	5532,78	
14	0,280000	3,57143	-0,2302	-0,3218	3,91	3977,96	
15	0,300000	3,33333	-13,5792	9,3198	6781,34	3876,56	
16	0,320000	3,12500	6,0130	-6,4173	1933,44	3110,14	
17	0,340000	2,94118	8,5729	-3,7207	2183,45	2504,08	
18	0,360000	2,77778	-1,3262	9,7073	2399,76	3673,24	
19	0,380000	2,63158	-16,0396	3,7900	6790,79	6617,76	

№	Частота	Период	Коэффициент при косинусе	Коэффициент при синусе	Периодограмма	Плотность	Вес Хэмминга
20	0,400000	2,50000	2,6675	-20,1657	10344,27	9375,02	
21	0,420000	2,38095	20,3155	8,6922	12206,82	8825,42	
22	0,440000	2,27273	-9,7499	2,7351	2563,55	4693,61	
23	0,460000	2,17391	-1,0358	4,8213	607,94	2420,20	
24	0,480000	2,08333	-6,2028	-7,9271	2532,83	4728,00	
25	0,500000	2,00000	23,2887	0,0000	13559,06	7317,76	

Аналогично получено разложение в ряд для расходов каждого месяца и для среднегодовых расходов. По первым шести гармоникам рассчитаны значения среднемесячных расходов (табл. 5).

Таблица 5

Формирование исходных данных для регрессионной модели (5) за январь, р. Пур – г. Уренгой

№	Год	Среднемесячный расход воды за январь, м ³ /с		№	Год	Среднемесячный расход воды за январь, м ³ /с	
		фактический	результат разложения в ряд Фурье			фактический	результат разложения в ряд Фурье
1	1962	244	376	15	1992	153	352
2	1963	240	370	16	1993	179	345
3	1964	273	356	17	1994	185	357
4	1965	245	336	18	1995	172	383
5	1970	169	313	19	1996	208	408
6	1972	293	297	20	1999	405	418
7	1973	297	296	21	2000	381	403
8	1974	481	315	22	2001	344	363
9	1975	236	348	23	2003	488	311
10	1976	320	384	24	2004	363	260
11	1978	163	410	25	2008	237	224
12	1979	379	416	26	2011	358	209
13	1985	282	402	27	2012	373	211
14	1990	137	375	28	2013	396	223

Таким же образом подготовлены исходные данные за каждый месяц и год. По этим данным построены регрессионные зависимости для каждого месяца (табл. 6, 7, рис. 3).

Таблица 6

Значения коэффициентов уравнения модели (5), построенные по обучающим данным за период наблюдений с 1962 по 2014 г.

Коэффициент	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a_0	79,6	29,7	84,9	284	2686	165,0	-1664	124,5	-110,3	-142,1	-6,53	-4,78
a_1	0,43	0,43	0,30	0,21	-0,36	3,54	2,24	0,95	0,86	0,94	0,78	0,71
a_2	-0,33	-0,41	-0,46	-0,99	-6,37	-0,04	0,32	-0,17	0,22	0,07	-0,16	-0,32

Таблица 7

Среднемесячные расходы воды, м³/с, и результаты прогнозирования по модели (3) на проверочной выборке данных за период 2015-2020 гг.

Мес.	2015		2016		2017		2018		2019		2020	
	факт	прогн										
1	759	272	583	330	286	327	539	308	392	362	931	315
2	601	277	464	278	272	275	450	262	331	239	737	218
3	513	208	372	216	265	226	427	235	263	242	573	248
4	539	294	367	268	277	245	367	223	244	198	886	173
5	3020	694	1800	468	549	342	461	354	1100	428	3240	511
6	2970	2975	2530	3042	3460	3107	3160	3132	2940	3108	1570	3101
7	1130	1308	940	1397	1820	1482	1290	1532	1290	1529	1260	1499
8	965	670	521	689	1070	706	712	707	752	692	879	684
9	963	749	571	783	1140	808	657	813	1063	796	914	779
10	1020	674	535	699	970	719	651	725	1318	715	813	707
11	969	524	538	523	796	520	562	515	1563	507	936	512
12	823	447	389	469	646	488	453	486	1288	458	719	423

Среднеквадратическая ошибка прогноза рассчитана по формуле (4) и составила 21,1%.

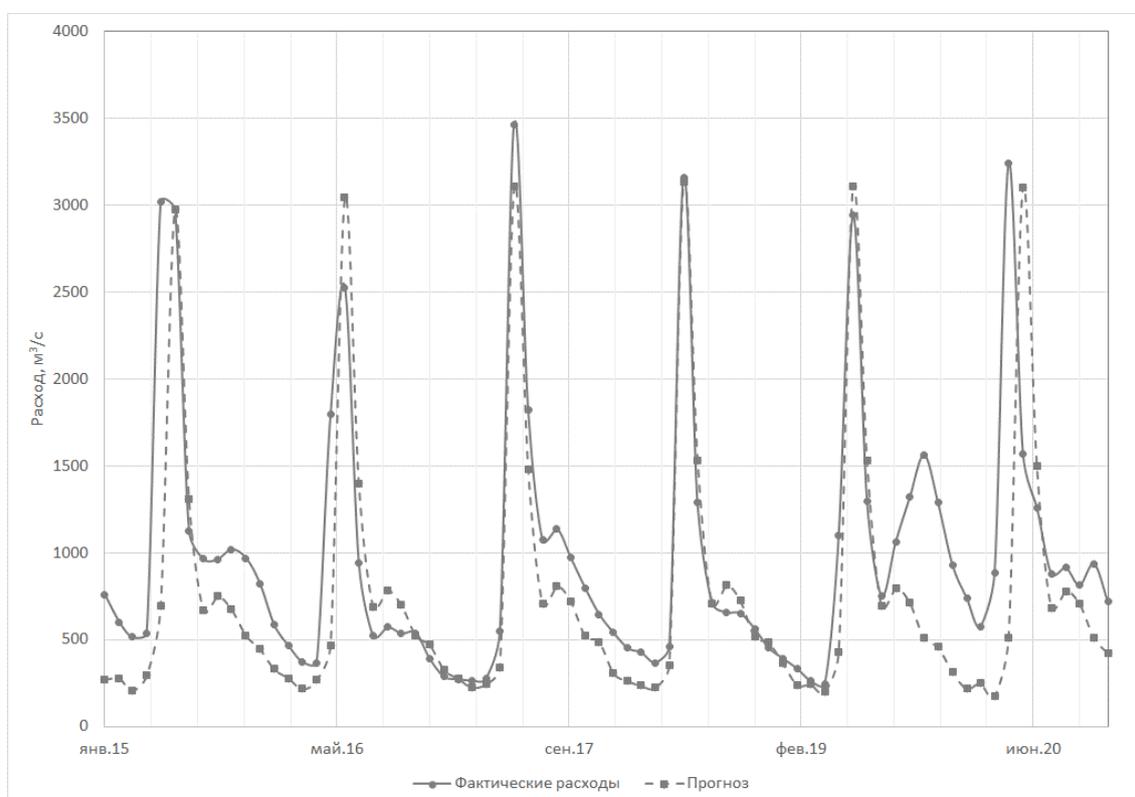


Рис. 3. График хода фактических среднегодовых расходов воды (сплошная линия) и рассчитанных по прогнозной модели (пунктирная) (5)

Как показывает график, прогноз дает достаточно хороший результат на 4 года вперед (рис. 3). Далее необходимо корректировать коэффициенты в регрессионной модели.

Преимущество данного подхода заключается в том, что предложенный алгоритм достаточно просто можно запрограммировать, автоматизировать прогноз и его корректировку с привлечением новых данных ежемесячно. К тому же прогноз среднемесячных расходов на несколько лет вперед оказывается достаточно точным.

Заключение

В статье проверены два варианта долгосрочного прогнозирования среднемесячного стока арктических рек на примере р. Пур по методу группового учета аргументов (МГУА), который в данном классе функций позволяет определить оптимальную структуру искомой зависимости и идентифицировать параметры. Для проверки качества прогнозирования ряд наблюдений разбит на две части. Первая часть (обучающая последовательность) используется для определения оценок коэффициентов по методу наименьших квадратов. Вторая часть (проверочная последовательность) используется для оценивания прогнозирующей модели. В результате ряд наблюдений за стоком с 1962 по 2020 г. разбит на обучающую (1962–2014 гг.) и проверочную (2015–2020 гг.) последовательности. По первому варианту прогнозирования с заблаговременностью 1 месяц получилась средняя квадратическая ошибка 9,7 %. По второму варианту прогноза с заблаговременностью 6 лет средняя квадратическая ошибка составила 21,1 %.

Данный подход представляется весьма перспективным благодаря именно тому, что с достаточно большой точностью можно предсказывать значения среднемесячного и среднегодового стока на 1-4 года вперед. Далее необходимо уточнять оценки коэффициентов модели и проверять качество обновленной модели.

Особую ценность данный подход приобретает при необходимости комплексного подхода в целях планирования использования и охраны водных ресурсов и проектирования водохозяйственных мероприятий.

Заявленный вклад авторов: Саноцкая Н.А. – 70%, Мышко В.В. – 30%.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Акилина В.А., Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Долгосрочное прогнозирование характеристик весеннего стока рек бассейна Тобола // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4(386). С. 64–78.
2. Беляев Б.М., Варенцова Н.А. Разработка долгосрочных гидрологических прогнозов характеристик весеннего половодья на основе современной гидрометеорологической информации и методов её обработки // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии: сборник докладов / под ред. О.М. Макарьевой. Санкт-Петербург: Научное издательство «Технологии», 2018. С. 698–702.
3. Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на STATISTICA. Москва: Горячая линия–Телеком», 2021–354 с.
4. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 176–189.
5. Ефременко А.Н., Моисеева Н.О., Потемкин В.С., Черный В.В. Метод прогнозирования подъема уровня воды // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. № S674. С. 171–175.
6. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. Киев: Техника, 1975. 312 с.
7. Котова Н.А., Иванов Н.А. Особенности формирования и прогнозирования характеристик весеннего половодья на реках Иркутской области // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 280–284.
8. Кулин Н.И., Козлов Е.А., Жук Ю.А. Прогнозирование весеннего половодья рек с использованием методов машинного обучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 1. С. 135–142.

9. Пальчевский Е.В., Христодуло О.И., Павлов С.В., Соколова А.В. Анализ ретроспективных данных с применением технологий искусственного интеллекта для прогнозирования угроз в сложных распределенных системах // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2021. Т. 18, № 2(200). С. 39–45.
10. Семенова А.В., Буковский М.Е. Зависимость пика весеннего половодья в верховьях реки Цна от климатических факторов // Географический вестник. 2022. № 1(60). С. 87–99.
11. Ушаков М.В. Долгосрочный прогноз наивысших уровней весеннего половодья на неизученном участке реки Сеймчан // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2020. Т. 6, № 1. С. 225–232.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2023. N 2/55

Hydraulic engineering, hydraulics and engineering hydrologywww.dvfu.ru/en/vestnikis

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-2/102-111>

Sanotskaya N., Myshko V.

NADEZHDA A. SANOTSKAYA, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Engineering Surveys of *the Russian State Hydrometeorological University*, Associate Professor of the Department of Computer Technology and Software Engineering, na_san@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9272-4713>

VASILY V. MYSHKO, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Technology and Software Engineering, vasvasmishko@mail.ru
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
 Saint-Petersburg, Russia

Long-term forecasting of the average monthly runoff of medium Arctic rivers on the example of the river Pur

Abstract. The article presents two options for long-term forecasting of the average monthly flow of Arctic rivers using the method of group accounting of arguments (MGAA). MGAA allows you to determine the optimal structure of the dependence and determine the parameters. The Pur River, which can be considered as a typical middle Arctic river, was chosen as the object of study. To test the quality of the prediction, the set of observations is split into two parts: a training sequence, which is used to estimate the coefficients by the least squares method, and a test sequence, which is used to evaluate the predictive model. This approach is especially valuable in cases where an integrated approach to planning the use and protection of water resources is needed, as well as when designing water management measures.

Keywords: hydrological forecasting, water flow, arctic rivers

For citation: Sanotskaya N., Myshko V. Long-term forecasting of the average monthly runoff of medium Arctic rivers on the example of the river Pur. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(2):102-111. (In Russ.).

Contribution of the authors: Sanotskaya N.A. – 70 %, Myshko V.V. – 30%.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Akilina V.A., Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., Yumina N.M. Long-term forecasting of the characteristics of the spring runoff of rivers in the Tobol basin. *Hydrometeorological research and forecasts*. 2022;(4):64-78. (In Russ.).
2. Belyaev B.M., Varentsova N.A. Development of long-term hydrological forecasts for the characteristics of spring floods based on modern hydrometeorological information and methods for its processing. *Third Vinogradov Readings. The limits of hydrology. Facets of hydrology: a collection of reports* / ed. by O.M. Makarieva. St. Petersburg, Science-intensive technologies, 2018. P. 698-702. (In Russ.).
3. Borovikov V.P. A popular introduction to modern data analysis and machine learning on STATISTICA. Moscow, Hot Line - Telecom, 2021. 354 p. (In Russ.).

4. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Efficiency of Modeling and Forecasting River Flow. *Hydrometeorological Research and Forecasts*. 2020;(1):176-189. (In Russ.).
5. Efremenko A.N., Moiseeva N.O., Potemkin V.S., Cherny V.V. Method for predicting the rise of the water level. *Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*. 2020;(S674):171-175. (In Russ.).
6. Ivakhnenko A.G. Long-term forecasting and control of complex systems. Kyiv, Technique, 1975. 312 p. (In Russ.).
7. Kotova N.A., Ivanov N.A. Peculiarities of formation and forecasting of spring flood characteristics on the rivers of the Irkutsk region. *Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia. Materials of the All-Russian scientific-practical conference*. 2018. P. 280-284. (In Russ.).
8. Kulin N.I., Kozlov E.A., Zhuk Yu.A. Forecasting the spring flood of rivers using machine learning methods. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*. 2021;21(1):135-142. (In Russ.).
9. Palchevsky E.V., Khristodulo O.I., Pavlov S.V., Sokolova A.V. Analysis of retrospective data using artificial intelligence technologies for threat prediction in complex distributed systems. *Bulletin of computer and information technologies*. 2021;18(2):39-45. (In Russ.).
10. Semenova A.V., Bukovsky M.E. Dependence of the spring flood peak in the upper reaches of the Tsna River on climatic factors. *Geographical Bulletin*. 2022;(1):87-99. (In Russ.).
11. Ushakov M.V. Long-term forecast of the highest levels of spring floods in the unexplored section of the Seimchan River. *Uchenye zapiski V.I. Vernadsky. Geography. Geology*. 2020;6(1):225-232. (In Russ.).