
ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 556.5.048

**КОЛЕБАНИЯ ВОД МЕСТНОГО ФОРМИРОВАНИЯ
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОКА В РЕГИОНАХ
СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ**

© 2018 г. Алексей В. Бабкин*, Кантибек Ш. Кадилов,
Никита И. Семейкин, Светлана Е. Раинчик

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия*

**E-mail: Abav@mail.ru*

Поступила в редакцию 14.04.2016 г.

Аннотация. Временные ряды вод местного формирования субъектов Российской Федерации Северо-Западного федерального округа проанализированы с использованием метода “Периодичностей”. Установлено, что периоды длиной 4 года, 8 и 11 лет повторяются в этих рядах чаще других. Наибольшее число раз (8 из 10) оказались выявленными синусоиды с периодом 11 лет. По синусоидам с этими периодами, по выявленным синусоидам с периодами, превышающими 29 лет (с длинными периодами), а также по комбинации синусоид с периодом 11 лет и с длинными периодами, оценивались поверочные прогнозы местного стока с заблаговременностью 5 лет. Наилучшие результаты прогнозов получены по комбинациям синусоид с 11-летним периодом и с длинными периодами. В схеме прогнозирования, приведшей к наилучшим результатам, присутствует синусоида с периодом, выявленным в наибольшем числе рядов местного стока. Это обстоятельство указывает на целесообразность оценки повторяемости тех же периодов в различных рядах при анализе, моделировании и прогнозировании вод местного формирования как административных, так и физико-географических регионов, например бассейнов рек и озер. Результаты прогнозирования могут быть улучшены, если удастся установить закономерности запаздывания синусоид с выявленными периодами друг к другу и использовать их при расчетах будущего стока.

Ключевые слова: местный сток, временные ряды, скрытые гармоника, долгосрочный прогноз.

DOI: 10.7868/S2587556618010046

**Fluctuations in the local formation waters
and runoff forecasting in regions
of the Northwestern of Russia**

Aleksei V. Babkin*, Kantibek Sh. Kadirov, Nikita I. Semeikin, and Svetlana E. Rainchik

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

**E-mail: Abav@mail.ru*

Received April 14, 2016

Abstract. The time series of waters of local formation of federal subjects of the Northwestern Federal District are analyzed by the method of the “Periodicities”. The periods with the length of 4, 8 and 11 years are repeated in these time series more often than the others. The most times (8 from 10) are revealed the sinusoids with the period of 11 years. The training forecasts of the local runoff are computed with the lead time of 5 years by the sinusoids with these periods, by the revealed sinusoids with periods larger than 29 years (long periods), and by the combination of sinusoids with the period of 11 years and long periods. The results of the training forecasts are tested by the new independent data. The best forecast results are achieved by the combination of the sinusoids with period of 11 years and with long periods. The scheme of prediction with the best forecast results engages the sine with the period, revealed in the most number of time series of runoff of local formation. This points out for the expedience of estimation of the repetitiveness of the same periods in the different time series under analysis, modelling and forecasting waters of local formation both in the administrative and

physico-geographical regions, for example, basins of rivers and lakes. The forecasting results may be improved if some regularities of time lag of sinusoids with revealed periods to each other will be found and applied for calculations of the future runoff.

Keywords: runoff of local formation, time series, hidden harmonics, long-range forecast.

Введение. Северо-Западный федеральный округ Российской Федерации занимает площадь 1.687 млн км² и характеризуется значительными водными ресурсами. По его территории протекают крупнейшие реки Европейской части России: Печора, Северная Двина, Онега, Мезень, несущие свои воды в моря Северного Ледовитого океана, а также Нева и Нарва, впадающие в Балтийское море. Объем местного стока федерального округа (стока вод местного формирования) составляет около 560 км³/год [5].

В состав округа входят 11 субъектов Федерации: Республика Карелия, Республика Коми, Ненецкий автономный округ (АО), Архангельская, Вологодская, Мурманская, Ленинградская, Новгородская, Псковская и Калининградская области и город федерального значения Санкт-Петербург. Воды местного формирования здесь изменяются циклически [1], что влияет на многие отрасли современного производства, такие как водный транспорт, туризм, коммунально-бытовое и промышленное водоснабжение и др. Они являются обобщенным климатическим показателем увлажнения территории. Поэтому развитие методологии анализа временных рядов местного стока и использование полученных результатов для долгосрочных прогнозов водных ресурсов является весьма актуальной научной проблемой, связанной с социально-экономическим развитием регионов данного федерального округа.

Целью настоящей работы является выявление закономерностей временных рядов местного стока административных территорий Северо-Западного федерального округа методом “Периодичностей” и определение скрытых периодов в его колебаниях. Выявленные при анализе синусоиды и их комбинации используются для расчетов поверочных прогнозов местного стока с заблаговременностью 5 лет и оценки результатов прогнозирования на независимом материале.

Временные ряды местного стока регионов Северо-Западного федерального округа и принципы оценки результатов их прогнозов. Временные ряды местного стока получены в Информационно-аналитическом центре Государственного водного кадастра (ИАЦ ГВК) ФГБУ Государственный гидрологический институт (ГГИ). Их

значения имеются в наличии с 1930 г. В настоящей работе они анализировались по 2009 г. Последние пять значений этих рядов с 2010 по 2014 г. использованы для расчета погодичных поверочных прогнозов местного стока.

Долгосрочный прогноз местного годового стока считается оправдавшимся, если разность его наблюдаемого и предсказанного значений меньше допустимой ошибки прогноза $\Delta_{\text{доп}}$, которая равна 0.674 от среднего квадратического отклонения его временного ряда [2]. Оправдываемость погодичного прогноза на пятилетний поверочный интервал оценивается по количеству оправдавшихся прогнозов N .

Другой характеристикой результата прогнозирования местного стока на поверочном интервале является сумма квадратов его ошибок. Для анализа и сопоставления результатов прогнозирования будем использовать его относительную ошибку dr , оцениваемую по выражению

$$dr = \frac{0.674}{\Delta_{\text{доп}}} \sqrt{\frac{S_{\text{пр}}}{l}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{пр}}$ — сумма квадратов ошибок прогнозов (разностей между наблюдаемыми и предсказанными значениями местного стока за каждый год поверочного интервала), l — число лет поверочного интервала (в данном случае оно равно 5).

Успешный долгосрочный прогноз местного стока должен быть не хуже его оценки на будущее по среднему значению временного ряда.

В табл. 1 приведены субъекты Федерации Северо-Западного федерального округа, площади их территорий S , средние за 1930–2009 гг. значения рядов их местного стока $Q_{\text{ср}}$, средние квадратические отклонения σ и допустимые ошибки прогнозов $\Delta_{\text{доп}}$.

Регионы Северо-Западного федерального округа существенно различаются между собой по площади: наибольшая площадь у Архангельской области, включая Ненецкий АО (0.590 млн км²), и у Республики Коми (0.417 млн км²). Наименьшая площадь — у Калининградской области (0.015 млн км²). Площади Новгородской и Псковской областей примерно равны между собой (по 0.055 млн км²).

Таблица 1. Характеристики временных рядов местного стока субъектов Федерации Северо-Западного федерального округа

№	Субъекты РФ	S , 10^6 км^2	$Q_{\text{ср}}$, $\text{км}^3/\text{год}$	σ , $\text{км}^3/\text{год}$	$\Delta_{\text{доп}}$, $\text{км}^3/\text{год}$
1.	Архангельская обл.	0.590	201.16	13.20	8.90
2.	Вологодская обл.	0.145	38.74	7.27	4.90
3.	Калининградская обл.	0.015	2.24	0.87	0.59
4.	Ленинградская обл.	0.084	23.17	6.73	4.53
5.	Республика Карелия	0.181	54.66	6.13	4.13
6.	Мурманская обл.	0.145	54.46	6.55	4.41
7.	Республики Коми	0.417	159.60	22.27	15.01
8.	Новгородская обл.	0.055	13.68	3.22	2.17
9.	Ненецкий АО	0.177	64.28	9.62	6.48
10.	Псковская обл.	0.055	11.66	3.11	2.09

Наибольшие и наименьшие средние значения местного стока отмечаются у тех же субъектов Федерации, у которых соответственно наибольшие и наименьшие площади. Самый большой местный сток – $201.16 \text{ км}^3/\text{год}$ в Архангельской области, а самый маленький – $2.24 \text{ км}^3/\text{год}$ – в Калининградской. Средний местный сток Республики Коми – $159.6 \text{ км}^3/\text{год}$, а у Новгородской и Псковской областей $13.68 \text{ км}^3/\text{год}$ и $11.66 \text{ км}^3/\text{год}$.

Наибольшие значения средних квадратических отклонений и допустимых ошибок прогнозов местного стока получены для Республики Коми – $22.27 \text{ км}^3/\text{год}$ и $15.01 \text{ км}^3/\text{год}$, и для Архангельской области – $13.20 \text{ км}^3/\text{год}$ и $8.90 \text{ км}^3/\text{год}$. Наименьшие величины среднего квадратического отклонения и допустимой ошибки прогнозирования рассчитаны для местного стока Калининградской области – $0.87 \text{ км}^3/\text{год}$ и $0.59 \text{ км}^3/\text{год}$. Средние квадратические отклонения местного стока Новгородской и Псковской областей составили соответственно $3.22 \text{ км}^3/\text{год}$ и $3.11 \text{ км}^3/\text{год}$. Допустимые ошибки их прогнозирования равны $2.17 \text{ км}^3/\text{год}$ и $2.09 \text{ км}^3/\text{год}$.

Метод “Периодичностей” для анализа временных рядов местного стока регионов Северо-Западного федерального округа. Метод “Периодичностей” основан на аппроксимации временных рядов местного стока синусоидальными функциями последовательно с пошаговым изменением периода [3]. Для каждого периода T методом наименьших квадратов [6] рассчитываются амплитуда $\delta Q/2$, фаза синусоиды φ , аппроксимирующей ряд наилучшим образом, постоянное значение, около которого синусоида колеблется Q_0 , а также ее сумма квадратов разностей со значениями ряда S_a .

У некоторых периодов, в зависимости от периода аппроксимации, отмечаются минимумы сумм

квадратических разностей наилучшей аппроксимирующей синусоиды и временного ряда. Эти минимумы могут быть признаком присутствия здесь периодичности.

В табл. 2 как пример представлены результаты синусоидальной аппроксимации временных рядов местного стока Ленинградской и Новгородской областей. Аппроксимация проводилась в диапазоне значений периодов от 3 лет до продолжительности ряда наблюдений без поверочного интервала. У Ленинградской и у Новгородской областей у периодов длиной 4 года, 8, 11 и 30 лет отмечаются минимумы сумм квадратических разностей рядов местного стока и аппроксимирующих их синусоид. У Ленинградской области эти минимумы оказались также у периодов, длиной 13, 17 лет и 61 год, а у Новгородской – 15 и 19 лет.

Сумма квадратов разностей S_a однозначно связана с корреляцией аппроксимирующей синусоиды и значений ряда местного стока. Самые маленькие суммы квадратов разностей с аппроксимирующими синусоидами у рядов местного стока как Ленинградской, так и Новгородской области получены у периода, длиной 30 лет. Синусоиды с этим периодом характеризуются наибольшей корреляцией со значениями временных рядов местного стока этих областей.

Периоды колебаний местного стока на территориях субъектов Федерации Северо-Западного федерального округа. Проведена аппроксимация синусоидальными функциями всех временных рядов местного стока. Периоды с минимумами сумм квадратов разностей временных рядов и синусоид их аппроксимации представлены в табл. 3, где в первой строке со второго столбца представлена длина периодов аппроксимации. Если какой-либо период не выявлен ни у одного из анализируемых рядов, столбец с его длиной в таблице

Таблица 2. Синусоидальная аппроксимация временных рядов местного стока Ленинградской и Новгородской областей

T , год	Q_{04} , км ³ /год	$\delta Q_4/2$, км ³ /год	φ_4 , радиан	S_{a4} , (км ³ /год) ²	Q_{08} , км ³ /год	$\delta Q_8/2$, км ³ /год	φ_8 , радиан	S_{a8} , (км ³ /год) ²
3.0	23.163	1.286	−0.6341	3554.250	13.654	0.579	1.5784	813.8764
4.0	23.172	1.962	3.0098	3466.645	13.646	0.994	−1.0870	787.5573
5.0	23.172	1.730	2.5802	3500.922	13.646	0.224	−1.4178	825.0920
6.0	23.198	1.333	−0.4912	3549.178	13.645	0.467	1.7381	818.4539
7.0	23.167	.957	3.8524	3584.239	13.661	0.539	−0.3397	815.4150
8.0	23.172	1.141	0.5354	3568.567	13.646	0.767	2.3784	803.5631
9.0	23.183	1.100	0.0986	3572.475	13.641	0.405	2.4033	820.6092
10.0	23.172	1.390	3.5516	3543.336	13.646	0.199	3.6896	825.5069
11.0	23.223	2.594	2.2373	3353.731	13.643	1.124	2.9546	777.7373
12.0	23.067	2.510	0.8061	3374.987	13.618	1.049	1.6600	782.9728
13.0	23.136	2.572	3.7620	3358.012	13.635	0.505	−1.2006	816.7299
14.0	23.165	1.929	1.9353	3467.683	13.633	0.348	1.0181	822.3049
15.0	23.114	1.202	3.1981	3562.059	13.616	0.652	3.2712	809.8607
16.0	23.172	1.467	3.3580	3534.566	13.646	0.331	−1.4967	822.7152
17.0	23.193	1.543	4.3098	3522.700	13.627	0.371	2.2456	821.7651
18.0	23.146	1.324	0.2448	3551.343	13.590	0.800	−1.0472	801.3981
19.0	23.138	0.961	4.4247	3583.564	13.605	0.895	3.7957	794.0156
20.0	23.172	0.728	−1.4330	3599.494	13.646	0.728	−1.2666	805.9075
21.0	23.190	0.506	2.1713	3610.481	13.662	0.352	3.3124	822.2804
22.0	23.154	0.430	2.4347	3613.190	13.631	0.257	0.6671	824.4629
23.0	23.093	0.878	0.8913	3590.151	13.586	0.699	0.3920	807.7307
24.0	23.054	1.462	4.0969	3533.083	13.562	1.068	3.9938	780.5099
25.0	23.061	2.082	−0.6155	3442.884	13.571	1.357	−0.5295	751.2057
26.0	23.115	2.673	−0.5368	3331.824	13.609	1.588	−0.3643	724.4728
27.0	23.205	3.168	4.4681	3221.201	13.667	1.769	4.6716	703.0585
28.0	23.310	3.525	1.9504	3131.769	13.730	1.891	2.1574	688.7783
29.0	23.405	3.728	4.5851	3076.625	13.784	1.948	−1.4999	682.0861
30.0	23.467	3.785	−0.0914	3058.570	13.820	1.947	0.0918	681.5883
31.0	23.488	3.731	0.5845	3071.931	13.833	1.915	0.7494	684.6744
32.0	23.474	3.607	0.4209	3107.668	13.828	1.876	0.5667	688.9558
33.0	23.436	3.437	−0.4993	3157.736	13.811	1.845	−0.3693	693.2511
34.0	23.386	3.230	4.1797	3216.276	13.788	1.819	4.3018	697.5620
35.0	23.333	2.985	1.9530	3278.764	13.763	1.790	2.0788	702.4551
36.0	23.284	2.706	−0.8449	3341.127	13.738	1.749	−0.7008	708.4319
37.0	23.242	2.404	2.1119	3399.676	13.714	1.692	2.2923	715.6077
38.0	23.209	2.094	4.5760	3451.532	13.691	1.623	−1.4684	723.7104
39.0	23.185	1.791	0.2935	3494.961	13.669	1.546	0.6190	732.2615
40.0	23.172	1.511	1.8542	3529.377	13.646	1.469	2.3033	740.7620
41.0	23.170	1.265	2.9928	3555.064	13.624	1.396	3.6132	748.8104
42.0	23.177	1.069	3.7243	3572.855	13.601	1.332	4.5743	756.1404
43.0	23.193	0.935	4.0694	3583.861	13.578	1.277	−1.0736	762.6106
44.0	23.217	0.874	4.0691	3589.295	13.555	1.232	−0.7434	768.1738
60.0	23.473	1.480	2.4820	3531.797	—	—	—	—
61.0	23.463	1.473	−0.4283	3531.601	—	—	—	—
62.0	23.452	1.464	2.8382	3531.739	—	—	—	—

не приводится. Наличие периодов с минимумом суммы квадратов разностей временного ряда и аппроксимирующей его синусоиды помечено плюсами. В последней строке проводится сложение

фактов присутствия тех же самых периодов во всех рядах местного стока.

Больше всего оказался выявленным период длиной 11 лет. Он установлен у 8 рядов. У 7 рядов

Таблица 3. Периоды с минимумами сумм квадратических разностей аппроксимирующих синусоид и значений временных рядов местного стока

Субъекты Федерации	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16	17	18	19	20	21	24	26	27	29	30	31	35	36	39	43	44	61
Архангельская обл.	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Вологодская обл.	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Калининградская обл.	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+
Ленинградская обл.	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Республика Карелия	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Мурманская обл.	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Республика Коми	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-
Новгородская обл.	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Ненецкий округ	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Псковская обл.	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Итого	1	7	3	2	2	6	2	1	8	2	5	3	3	1	1	1	3	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1

выявлен период длиной 4 года. Период длиной 8 лет выявлен 6 раз. Период 13 лет выявлен у 5 рядов. По три раза установлены периоды 5, 15, 16 и 20 лет, по 2 раза – периоды 6, 7, 9, 12, и 29 и 30 лет. Остальные периоды выявлены по одному разу либо не выявлялись.

У каждого рассмотренного ряда установлен, по крайней мере, один период в диапазоне его значений от 29 лет до длины рядов (80 лет). У местного стока Ленинградской области получено два таких периода: 30 лет и 61 год. Периоды в диапазоне от 29 лет и больше охарактеризуем как длинные, а периоды меньшей длины – как относительно короткие.

Отдельные выявленные периоды в колебаниях вод местного формирования были установлены в динамике глобальных космо-геофизических процессов, и могут быть обусловлены ими. В частности, период длиной около 11 лет был выявлен в колебаниях солнечной активности [7], 7–9-летние и 18–20-летние обнаруживаются в динамике лунных приливов, а 4–6-летние характерны для полюсных приливов [4].

На рис. 1 представлены синусоиды в колебаниях местного стока субъектов Федерации Северо-Западного федерального округа с периодами, равными соответственно 4 года (а), 8 лет (б) и 11 лет (в), выявленными наибольшее число раз. Нанесенные на графики кривые рассчитывались как отношение разности текущего и минимального значения синусоиды к ее амплитуде. Синусоиды с периодом 4 года рассчитаны с шагом по времени 0.1 год, а с периодами 8 и 11 лет – с шагом 0.25 года.

На этих графиках выявленные синусоиды указаны теми же цифрами, что и номера субъектов Федерации в табл. 1. У рядов местного стока, где синусоиды с периодами, соответственно равными 4 года, 8 и 11 лет, не были выявлены, они не нанесены на графики и их номера не использованы.

Эти графики показывают, насколько экстремумы выявленных синусоид отстают друг от друга. Так, максимумы и минимумы синусоиды с периодом 4 года в колебаниях местного стока Псковской области отстают от экстремумов этой синусоиды Новгородской области, а Вологодской области – от Псковской. Разность времени наступления их экстремумов составляет соответственно 0.2 и 0.1 года.

Вслед за экстремумами синусоиды местного стока Псковской области последовательно через 0.4 года наступают экстремумы синусоиды Калининградской области, затем соответствующие

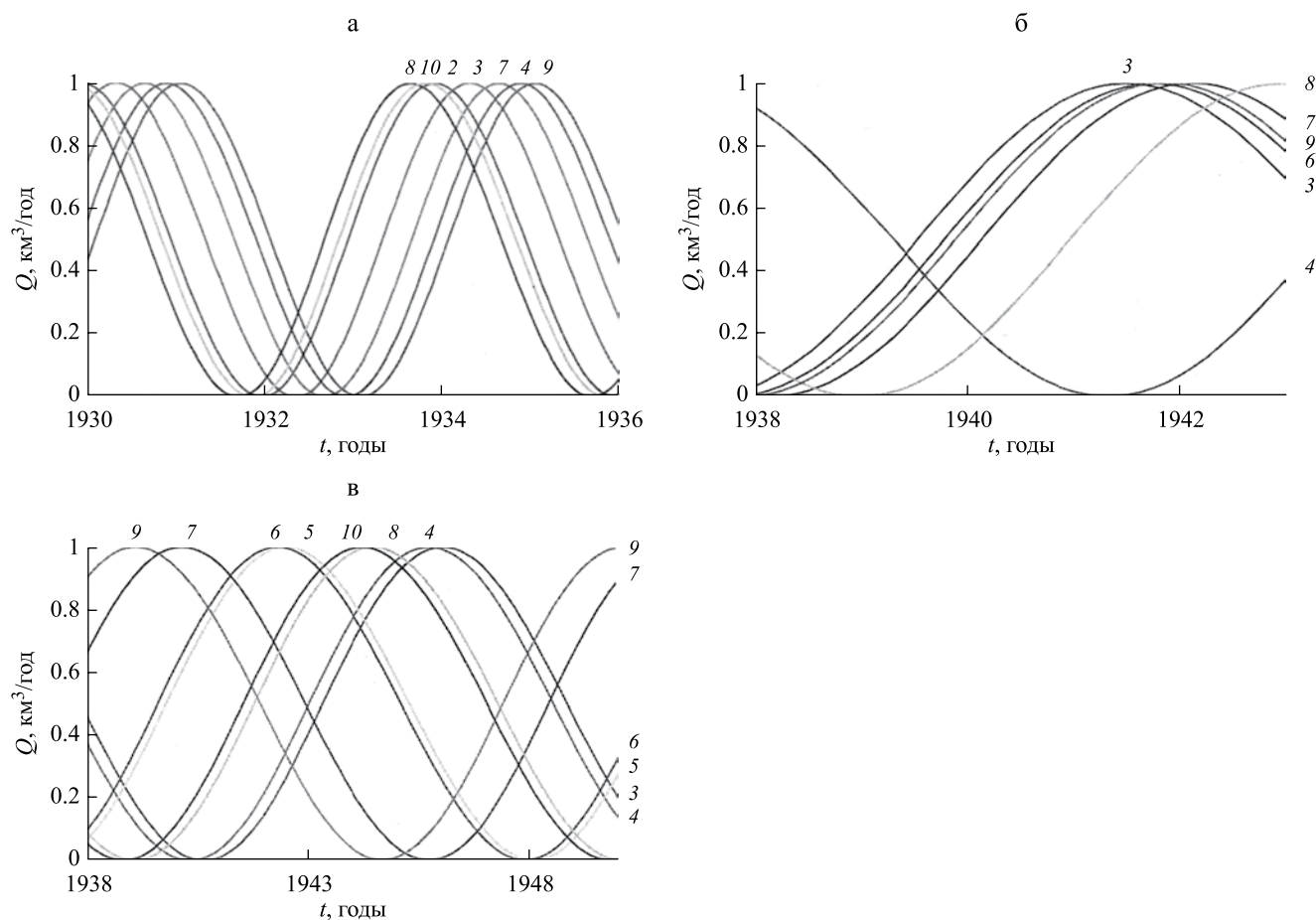


Рис. 1. Синусоиды в колебаниях местного стока субъектов Федерации Северо-Западного федерального округа с периодами 4 года (а), 8 лет (б) и 11 лет (в): 1 – Архангельская область, 2 – Вологодская область, 3 – Калининградская область, 4 – Ленинградская область, 5 – Республика Карелия, 6 – Мурманская область, 7 – Республика Коми, 8 – Новгородская область, 9 – Ненецкий автономный округ, 10 – Псковская область.

максимумы и минимумы синусоиды местного стока Республики Коми, а после – Ленинградской области. Экстремумы этой синусоиды в колебаниях местного стока Ненецкого автономного округа наступают после ее максимумов и минимумов Ленинградской области через 0.2 года.

В колебаниях местного стока в регионах Северо-Западного федерального округа с периодом 8 лет разность времени экстремумов синусоид Мурманской и Калининградской областей, Ненецкого округа и Мурманской области, Республики Коми и Ненецкого округа составляет 0.25 года. Экстремумы синусоиды местного стока Новгородской области отстают от таковых Республики Коми на 0.75 года, а экстремумы местного стока Ленинградской области от экстремумов Новгородской области на 2.25 года.

Максимумы и минимумы синусоиды местного стока с периодом 11 лет Республики Коми

запаздывают к соответствующим экстремумам этой синусоиды Ненецкого округа на 1 год, экстремумы этой синусоиды местного стока Мурманской области и Республики Карелия запаздывают к соответствующим максимумам и минимумам синусоиды местного стока Республики Коми на 2.25 года. Экстремумы синусоиды местного стока с периодом 11 лет Мурманской области и Республики Карелия приходятся практически на то же самое время.

Экстремумы синусоиды с периодом 11 лет в колебаниях местного стока Псковской области отстают от таковых для Карелии и Мурманской области на 1.75 года, экстремумы синусоиды Новгородской области от экстремумов Псковской области – на 0.25 года, экстремумы синусоиды Ленинградской области наступают через 1.25 года после экстремумов этой синусоиды Новгородской области, а затем, спустя 0.5 года, наступает время соответствующих

максимумов и минимумов для Калининградской области.

Поверочные прогнозы местного стока в регионах Северо-Западного федерального округа. По результатам анализа временных рядов местного стока проводились расчеты его поверочных прогнозов на 2010–2014 гг. Расчеты проведены с использованием гармоник, чьи периоды оказались установленными в этих рядах наибольшее число раз: 4 года, 8 лет, 11 лет, а также в диапазоне длинных периодов. Результаты расчетов поверочных прогнозов представлены в табл. 4 и 5.

В табл. 4 для каждого ряда стока приводится оправдываемость поверочных прогнозов, а в табл. 5 – их относительная ошибка. Индексом при символах числа оправдавшихся прогнозов и их относительной ошибки обозначена схема, по которой осуществлено

прогнозирование. Здесь приводятся результаты прогнозов по среднему значению временных рядов, соответственно – число оправдавшихся прогнозов и их относительные ошибки по синусоидам с короткими периодами – 4, 8 и 11 лет, результаты прогнозирования по синусоиде с длинным периодом и по функции объединяющей методом множественной корреляции синусоиду с длинным периодом и с периодом 11 лет.

По местному стоку Ленинградской области прогнозы рассчитаны по объединению синусоид с периодами 30 лет и 61 год и по их объединению с 11-летней синусоидой. Числа оправдавшихся прогнозов и их относительная ошибка обозначены символами с индексами “*дл*” и “*11дл*” соответственно.

У временных рядов местного стока, у которых гармоника с периодом 4 года, 8 лет либо 11 лет

Таблица 4. Оправдываемость прогнозов местного стока субъектов Федерации Северо-Западного федерального округа на 2010–2014 гг.

№	Субъекты Федерации	Число оправдавшихся прогнозов					
		$N_{\text{ср}}$	N_4	N_8	N_{11}	$N_{\text{дл}}$	$N_{11\text{дл}}$
1.	Архангельская обл.	3	3	3	3	4	4
2.	Вологодская обл.	2	2	2	2	1	1
3.	Калининградская обл.	2	2	3	1	4	4
4.	Ленинградская обл.	0	1	0	1	1	3
5.	Республика Карелия	3	3	3	3	3	3
6.	Мурманская обл.	3	3	1	3	3	3
7.	Республика Коми	4	4	4	3	4	3
8.	Новгородская обл.	2	2	1	2	3	4
9.	Ненецкий округ	1	2	1	1	1	1
10.	Псковская обл.	4	4	4	4	3	1
Итого		24	26	22	23	27	27
Оправдываемость		0.48	0.52	0.44	0.46	0.54	0.54

Таблица 5. Относительная ошибка прогнозов местного стока субъектов Федерации Северо-Западного федерального округа на 2010–2014 гг.

№	Субъекты Федерации	Относительная ошибка прогнозирования					
		$dr_{\text{ср}}$	dr_4	dr_8	dr_{11}	$dr_{\text{дл}}$	$dr_{11\text{дл}}$
1.	Архангельская обл.	0.611	0.611	0.611	0.611	0.495	0.495
2.	Вологодская обл.	0.873	1.058	0.873	0.873	1.065	1.065
3.	Калининградская обл.	0.775	0.860	0.894	0.888	0.566	0.620
4.	Ленинградская обл.	1.196	1.239	1.187	1.105	1.154	1.084
5.	Республика Карелия	0.893	0.893	0.893	0.951	0.886	0.910
6.	Мурманская обл.	0.727	0.727	0.945	0.625	0.693	0.615
7.	Республика Коми	0.552	0.463	0.601	0.648	0.605	0.697
8.	Новгородская обл.	0.977	1.106	1.138	0.766	0.973	0.432
9.	Ненецкий округ	1.544	1.476	1.516	1.612	1.476	1.528
10.	Псковская обл.	0.626	0.787	0.626	0.478	0.942	1.076
Итого		8.774	9.220	9.284	8.557	8.855	8.522
Среднее		0.877	0.922	0.928	0.856	0.886	0.852

не выявлена приведены результаты прогнозов по среднему значению. У временных рядов местного стока Архангельской и Вологодской областей в результатах прогноза по объединенным синусоидам с длинным периодом и с 11-летним периодом в табл. 4 и 5 соответственно указаны его оправдываемость и относительная ошибка по синусоиде с длинным периодом.

При прогнозировании стока по синусоиде с периодом 4 года, а также по синусоидам с длинными периодами, оправдываемость прогнозов получилась выше, чем по среднему значению, и средняя относительная ошибка прогнозирования также оказалась больше. Относительная ошибка и оправдываемость прогнозов оказались ниже, чем по среднему значению при расчетах стока по синусоиде с периодом 11 лет.

При прогнозировании по синусоиде с периодом 8 лет относительная ошибка получилась больше, чем по среднему значению, а оправдываемость прогнозов меньше.

На рис. 1 видно, что синусоиды с периодом колебаний 8 лет местного стока Калининградской области, Мурманской области, республики Коми и Ненецкого округа расположены сравнительно близко друг к другу, тогда как эти синусоиды Ленинградской и Новгородской областей находятся от них на значительном удалении. Если вместо результатов прогнозов местного стока Ленинградской и Новгородской областей по этим синусоидам, как неудовлетворяющим общему правилу, учитывать прогнозы по средним значениям их временных рядов, то итоговые результаты прогнозов по местному стоку всех рассмотренных рядов улучшатся. Оправдываемость прогнозов возрастет на 1 верный прогноз, а их средняя относительная ошибка несколько уменьшится.

По синусоидам с периодом 11 лет результаты прогнозирования местного стока оказались хуже, чем по среднему значению, там, где их экстремумы более южных субъектов Федерации запаздывают по отношению к более северным. Так, результаты прогнозов местного стока Ненецкого округа и Республики Коми получились хуже чем по среднему значению, у Республики Карелия хуже и лишь у Мурманской области несколько лучше.

Там, где экстремумы местного стока 11 летней синусоиды более северных субъектов Федерации запаздывают к соседним, более южным, результаты прогнозирования оказались лучше, чем по среднему значению. Результаты прогнозов местного стока Псковской, Новгородской

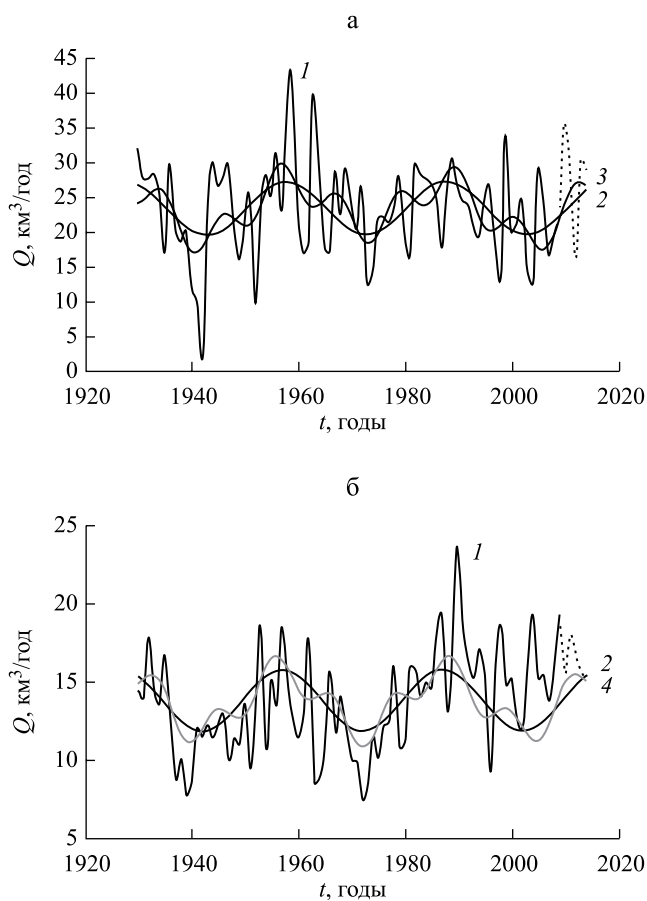


Рис. 2. Местный сток Ленинградской (а) и Новгородской областей (б): 1 — данные наблюдений (пунктиром обозначен участок поверочного прогноза 2010–2014 гг.), 2 — аппроксимирующие синусоиды с периодом 30 лет, 3 — комбинация синусоид с периодами 30, 61 и 11 лет ($\eta = 0.485$), 4 — комбинация синусоид с периодами 30 и 11 лет ($\eta = 0.477$).

и Ленинградской областей оказались лучше, чем по среднему значению.

Если местный сток прогнозировать только по синусоидам с периодом 11 лет, у которых экстремумы местного стока расположенных на одной долготе соседних более северных территорий запаздывают к более южным, а для остальных рядов учитывать результаты прогнозов по средним значениям временных рядов, то обобщенные результаты прогнозов по всем рядам местного стока субъектов Федерации Северо-Западного федерального округа оказались бы лучше. Однако данных для обоснования такой закономерности в зависимости от положения региона недостаточно.

На рис. 2 представлены временные ряды местного стока соответственно Ленинградской и Новгородской областей с выделенным интервалом

поверочного прогноза. Они аппроксимированы синусоидами с периодом 30 лет. На этот рисунок нанесены комбинации синусоид с периодами 11 лет, 30 лет и 61 год, установленные в колебаниях местного стока Ленинградской области и синусоид с периодами 30 и 11 лет колебаний местного стока Новгородской области. Также указана корреляция этих рядов и комбинаций синусоид η . На графике видно, что прогнозы по синусоидам с периодом 30 лет и по комбинациям синусоид получились несколько лучше, чем по среднему значению.

Заключение. Установлено, что в колебаниях местного стока субъектов РФ Северо-Западного федерального округа за 1930–2009 гг. чаще других повторяются периоды, длиной 4, 8 и 11 лет, причем 11-летний период повторяется наиболее часто. Проводились расчеты поверочных прогнозов по этим отдельным синусоидам, по синусоидам с периодами, чьи длины находятся в диапазоне 29–80 лет (синусоиды с длинными периодами), а также по комбинациям синусоид с длинными периодами и синусоид с 11-летним периодом, полученным с использованием методологии множественной корреляции.

Результаты поверочных прогнозов по этим схемам обобщались по всем рядам и сравнивались с прогнозами по среднему значению по двум критериям: по оправдываемости прогнозов и по их средней относительной ошибке. Прогнозы по синусоиде с периодом 8 лет оказались хуже, чем по среднему значению по этим двум критериям.

Прогнозы по синусоидам с периодом 4 года, 11 лет и с длинными периодами оказались лучше, чем по среднему значению по одному критерию, но хуже по другому критерию. Поэтому можно заключить, что прогнозы по этим синусоидам и по среднему значению получились примерно одного качества.

Результаты прогнозирования, вероятно, могут быть улучшены, если будут выявлены закономерности запаздывания выявленных синусоид местного стока с тем же периодом различных субъектов РФ в зависимости от их положения относительно друг друга. При этом может оказаться целесообразным не прогнозировать по синусоидам, не соответствующим общим закономерностям, а вместо них предсказывать местный сток по средним значениям.

При прогнозировании по комбинации синусоид с длинными периодами и 11-летним периодом результаты оказались лучше, чем по среднему значению по двум критериям. Из всех

представленных схем прогнозов результаты по этой комбинации синусоид оказались самые лучшие: самая маленькая средняя относительная ошибка и самая высокая, такая же, как и при расчетах по синусоидам с длинными периодами, оправдываемость.

Проводились также прогностические расчеты по схеме, объединяющей синусоиды с длинными периодами, 11-летним периодом, периодами длиной 8 и 4 года. Но, при добавлении в комбинацию синусоид с длинными периодами и 11-летним периодом других гармоник результаты прогнозов последовательно ухудшались, становясь хуже, чем по среднему значению.

Таким образом, наилучшая схема прогноза действует гармонику с периодом, выявленным самое большое число раз. Значит, оценка повторяемости тех же самых периодов временных рядов местного стока различных административных и географических регионов и выявление гармоник с периодами, повторяющимися в наибольшем числе рядов, весьма целесообразно для оценок местного стока на ближайшую перспективу.

Ухудшение результатов прогнозов при использовании синусоид с более короткими периодами может быть связано с тем фактом, что при единичном шаге изменения периода при аппроксимации временных рядов синусоидальными функциями периоды и другие характеристики наилучших аппроксимирующих синусоид оцениваются весьма неточно.

Длины периодов в колебаниях местного стока не обязательно должны быть целыми. Они могут содержать и дробную часть. Исследования по выявлению периодов, порядка 4 и 8 лет, в колебаниях гидрологических характеристик с дробной частью также могут быть проведены с использованием метода “Периодичностей” с заданием шага изменения периода 0.1 года или менее, что требует расширения форматов расчетной программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев В. Г.* Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних гидроэлектростанций. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1957. 524 с.
2. *Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д.* Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 419 с.
3. *Бабкин А. В.* Усовершенствованная модель оценки периодичности изменений уровня и элементов водного баланса Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 63–73.

4. Воробьев В. Н. О возможности влияния “полюсного” и 19-летнего лунного приливов на изменчивость стока Волги // Условия формирования и методы прогноза стока Волги. СПб.: Гидрометеоздат, 1995. С. 27–37.
5. Водные ресурсы России и их использование / Ред. И. А. Шикломанов. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 599 с.
6. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов. М.: Наука, 1962. 350 с.
7. Саруханян Э. И., Смирнов Н. П. Многолетние колебания стока Волги. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 165 с.
2. Apollov B. A., Kalinin G. P., Komarov V. D. *Kurs gidrologicheskikh prognozov* [Short Manual for Hydrological Forecasting]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974, 419 p.
3. Babkin A. V. An improved model of assessment of periodic changes in Caspian Sea level and water balance components. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2005, no. 11, pp. 63–73. (In Russ.).
4. Vorob'ev V. N. The possibility of impact of Pole and 19 year tidal waves for the variability of Volga River runoff, in *Usloviya formirovaniya i metody prognoza stoka Volgi* [Conditions of Volga Runoff Forming and Methods of its Forecast]. St.-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1995, pp. 27–37. (In Russ.).

REFERENCES

1. Andreyanov V. G. *Gidrologicheskie raschety pri proektirovanii mal'kh i srednikh gidroelektrostantsii* [Hydrological Computations for Projecting of Small and Average Water Power Stations], Sokolovskiy D. L., Voskresenskiy K. P., Ed. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1957, 524 p.
5. *Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use], Shiklomanov I. A., Ed. St.-Petersburg: State Hydrological Institute, 2008, 599 p.
6. Linnik Ju. V. *Metod naimen'shikh kvadratov* [Method of the Least Squares]. Moscow: Nauka Publ., 1962, 350 p.
7. Saruhanjan Je. I., Smirnov N. P. *Mноголетние колебания стока Волги* (Long-Term Variation of Volga River Runoff). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1971, 165 p.