

УДК 566.166(571.56)

АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ СРЕДНЕГОДОВЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ РЕК ЯКУТИИ

¹Капитонова Т.А., ¹Слепцов О.И., ²Кусатов К.И., ¹Стручкова Г.П.

¹ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова» СО РАН,
Якутск, e-mail: kapitonova@iptpn.usn.ru;

²Якутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Якутск

В статье представлены анализ и прогнозная оценка многолетних колебаний среднегодовых расходов воды и синхронности рек восточной и западной части Якутии, которая выполнена с помощью классического метода парных корреляций и графического метода. Ежегодные колебания уровней и расходов воды в реке представляют собой случайные величины, поэтому для построения прогностических моделей используются методы математической статистики. Одним из методов вероятностно-статистического аппарата, который подходит для прогнозирования изменений многолетних колебаний максимальных расходов воды, является метод гармонического анализа временных рядов. Предложенный подход позволяет получать прогнозные оценки многолетних колебаний среднегодовых расходов воды на определенный промежуток времени и строить модели изучаемого процесса (тренда, гармонической и шумовой составляющих) с достаточной точностью. В статье представлены результаты построенных прогностических моделей среднегодовых расходов воды на реках Яна, Колыма, Вилюй до 2011 г. и на их основе составлен числовой прогноз изменения до 2015 г. При установлении синхронности, асинхронности и цикличности колебаний расходов воды рек используются различные показатели и методы. В данной работе кроме метода парной корреляции использовался также графический – сравнение временных трендов среднегодовых расходов воды. Установлено, что в многолетних колебаниях среднегодовых расходов воды исследованных рек синхронность выражена слабо. Результаты исследований, полученные по многолетним данным наблюдений Гидрометцентра с использованием вероятностно-статистических методов, могут быть полезны при планировании и проектировании крупных энергетических и водохозяйственных систем на территории Республики Саха (Якутия).

Ключевые слова: среднегодовые расходы воды, синхронность рек, вероятностно-статистические методы, временные ряды, многолетние данные наблюдений

ANALYSIS OF LONG-TERM FLUCTUATIONS IN AVERAGE ANNUAL WATER CONSUMPTION OF THE YAKUTIA RIVERS

¹Kapitonova T.A., ¹Sleptsov O.I., ²Kusatov K.I., ¹Struchkova G.P.

¹The V.P. Larionov's Institute of Physical-Technical Problems of the North,
Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, e-mail: kapitonova@iptpn.usn.ru;

²State Institution «Yakutsk Department of Hydrometeorology and environmental monitoring», Yakutsk

The article presents the analysis and forecast estimation of long-term fluctuations of average annual water consumption and synchronicity of the rivers of Eastern and Western part of Yakutia, which is carried out with the help of the classical method of pair correlations and graphical method. Annual fluctuations in water levels and flow rates in the river are random variables, so the methods of mathematical statistics are used to build predictive models. One of the methods of the probabilistic-statistical apparatus, which is suitable for predicting changes in long-term fluctuations in the maximum water flow rate is the method of harmonic analysis of time series. The proposed approach makes it possible to obtain predictive estimates of long-term fluctuations in average annual water consumption for a certain period of time, and to build models of the studied process (trend, harmonic and noise components) with sufficient accuracy. The article presents the results of the constructed prognostic models of average annual water flow on the rivers Yana, Kolyma, Viluy until 2011. and on their basis, we will make a numerical forecast of changes until 2015. Various indicators and methods are used to establish the synchronicity, asynchrony and cyclicity of fluctuations in the water flow of rivers. In this paper, in addition to the pair correlation method, a graphical comparison of time trends of average annual water consumption was also used. It is established that in the multi-annual fluctuations of the average annual water flow of the rivers studied, the synchronicity is weakly expressed. The research results obtained from long-term observations of the hydrometeorological center using probabilistic and statistical methods can be useful in the planning and design of large energy and water systems in the Republic of Sakha (Yakutia).

Keywords: average annual water consumption, synchronicity of rivers, probabilistic and statistical methods, time series, long-term observations

Обширные площади территории Якутии находятся в различных климатических зонах. В республике хорошо развитая речная сеть, которая играет огромную роль в жизнедеятельности и жизнеобеспечении региона как одна из основных транспорт-

ных магистралей при перевозке пассажиров и грузов в короткий навигационный период, длительность которого зависит от географической и природно-климатической специфики. Ежегодные колебания уровней и расходов воды в реке представляют собой

случайные величины, поэтому для построения прогностических моделей часто используются методы математической статистики. Статистические модели позволяют учесть некоторые общие закономерности межгодовых колебаний климата, многолетних колебаний среднегодовых расходов воды, его цикличности, синхронности и асинхронности в различных районах и построить прогнозные модели на ближайшие годы. Исследование синхронности колебаний среднегодовых расходов воды в реках имеет важное значение также при решении многих научных и практических гидрологических задач, связанных с комплексным использованием водных ресурсов при планировании и проектировании крупных энергетических и водохозяйственных систем. Синхронность колебаний может быть полезна для установления закономерности изменчивости годового стока вод в арктической зоне, из-за недостаточного количества гидрологических постов. Представленные результаты могут стать основой для экстраполяции выявленных закономерностей расходов воды северных рек на более значительные временные интервалы, а возможно и на другие регионы со схожими природно-климатическими условиями.

Целью данной работы является решение задачи, связанной с анализом, адаптацией существующих и разработкой новых подходов при исследованиях закономерностей многолетних колебаний среднегодовых расходов воды в реках, полученных по многолетним данным наблюдений и статистики Гидрометцентра, используемых для планирования и проектирования крупных энергетических и водохозяйственных систем на территории Республики Саха (Якутия).

В создании методов и моделей, основанных на вероятностной теории описания речного стока, большой вклад был сделан российскими исследователями (Н.А. Картвелишвили, М.Ф. Менкель, В.А. Лобанов, С.Н. Крицкий, Д.А. Бураков и др.). Результаты исследований многолетних изменений основных параметров водного баланса рек и водосборов учитывались и использовались при построении моделей в работах [1–3]. В исследованиях [4–6] рассматривались, анализировались и классифицировались экстремальные гидрологические явления на территории России и других стран, был определен вклад природных и антропогенных влияний в их формирование. На основании полученных прогнозных моделей

были построены сценарии развития опасных гидрологических ситуаций, что давало возможность устранения и смягчения негативных последствий, а также использования полученных результатов при проектировании и управлении хозяйственными и промышленными объектами.

Материалы и методы исследования

В данной работе на основе метода парных корреляций и исследования трендов среднегодовых расходов воды выполнен анализ синхронности и пространственной однородности колебаний расходов воды рек Яны, Колымы и Вилюя. Выбор рек производился с учетом следующих критериев: наличие достаточно продолжительного ряда гидрологических наблюдений (более 75 лет); «непересечение» водосборов рек; отсутствие в бассейнах исследуемых водотоков существенных антропогенных воздействий на сток. Исследуемая территория состоит из двух регионов: регион I – реки бассейна Яны; регион II охватывает реки бассейна Колымы и Вилюя.

Река Колыма образуется от слияния рек Аян-Юрях и Кулу, берущих начало на Охотско-Колымском нагорье. Длина 2129 км (от истока реки Кеньеличи, правой составляющей реки Кулу, – 2513 км), из них около 1,4 тыс. км на территории Магаданской области, остальное – на территории Якутии. Площадь бассейна 643 тыс. км². Впадает в Колымский залив Восточно-Сибирского моря тремя главными протоками: Каменная Колыма – правая, судоходная, Походская Колыма и Чукочьа. Длина дельты 110 км, площадь 3000 км².

Река Яна образуется слиянием рек Сартанг и Дулгалах, которые стекают со склонов Верхоянского хребта. Длина – 872 км, площадь бассейна – 238 000 км². При впадении в Янский залив моря Лаптевых река образует дельту площадью 10200 км². При разработке методов и моделей прогнозирования поведения временных рядов за некоторый период времени выполняются следующие шаги [5, 6]:

– Необходимо провести предварительный анализ данных;

– Разработка новых или адаптация известных моделей, т.е. выбор кривых, описывающих явление, и численное оценивание параметров модели;

– Проверка адекватности и оценка точности используемых моделей;

– Оценка точного и интервального прогноза.

Одними из методов вероятностно-статистического аппарата, которые подходят для прогнозирования изменений среднегодовых расходов воды в реках является метод гармонического анализа временных рядов [7, 8]. Построим прогностические модели среднегодовых расходов воды на реках Яна, Колыма, Вилюй до 2011 г. и на их основе составим числовой прогноз изменения до 2015 г. В данной работе необходимо выполнить прогнозирование временного ряда H_{t+1}, H_{t+2}, \dots , по наблюдениям H_1, H_2, \dots, H_t , где t – время. Предполагается, что присущие данному процессу особенности и закономерности сохраняются в течение исследуемого периода, что является корректным при моделировании краткосрочных либо оперативных прогнозов. Для временных рядов используется часто статистический подход, который состоит в том, что временной ряд, описывающий развитие процесса, можно представить в виде трех составляющих компонент: функцию тренда (тенденция развития), циклическую компоненту, остаточную компоненту (белый шум).

$$H(t) = f(t) + u(t) + e(t),$$

где $f(t)$ – функция тренда (тенденция развития), $u(t)$ – циклическая компонента, $e(t)$ – остаточная компонента.

Предварительный анализ данных состоит в выполнении сглаживания данных наблюдения и определении наличия тренда временного ряда. При определении вида функции тренда и вычислении коэффициентов применяется метод наименьших квадратов. Этап удаления тренда необходимо сопровождать исследованием временного ряда на стационарность. Оценка зависимостей между последовательными значениями одного и того же ряда производится используя коэффициент автокорреляции. Считая значения рассматриваемого временного ряда случайными, предполагаем значения между их уровнями независимыми. Величина коэффициента автокорреляции может быть использована при определении периода колебаний. Построение статистической модели было выполнено, используя методику обработки данных, в основе которой применялась нелинейная многопараметрическая регрессия [7].

Начальным этапом моделирования данных является построение регрессионной модели. Для получения прогнозных значений среднегодовых расходов воды необхо-

димо провести композицию составляющих модели и обратное преобразование. Адекватность полученной модели определяется сравнением данных наблюдения с результатами прогноза.

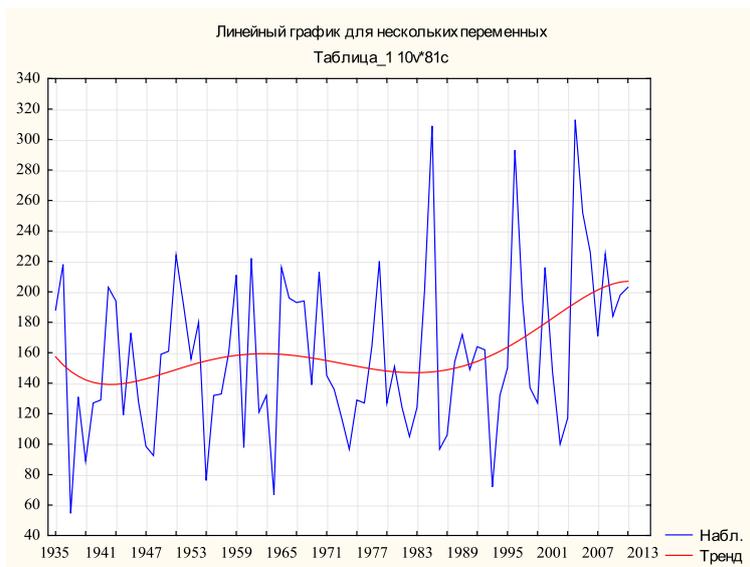
Прогноз среднегодовых расходов воды на реке Яна в районе Верхоянска (данные с 1935 г.). Судходство на участке Батагай – Верхоянск нерегулярно и возможно лишь в полноводный период. Для получения достаточно точных и надежных прогнозов необходимо изучить состояние процесса и выделить основные компоненты, которые входят в состав исследуемого временного ряда (тренд и циклические колебания – отклонения уровней отдельных периодов времени от тенденции динамики). Для аппроксимации временного тренда наиболее простым и чаще всего используемым подходом является его полиномиальное представление, когда соответствующая составляющая временного ряда – функция является полиномом, коэффициенты которого могут быть найдены методом наименьших квадратов.

Результаты исследования и их обсуждение

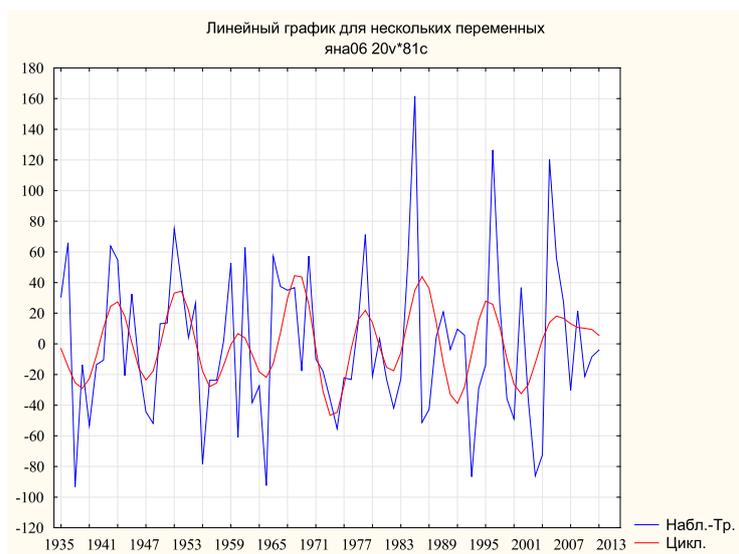
Стандартным методом выделения циклических составляющих временного ряда является разложение его в ряд Фурье. Используя методы предварительной обработки данных и анализ Фурье, мы получили математическую гармоническую модель, описывающую исходные данные, на основе которой делаем прогнозирование.

На рис. 1 представлены среднегодовые расходы воды, исходные данные и гармоническая составляющая на реке Яна в районе Верхоянска.

Прогноз среднегодовых расходов воды на реке Колыма в районе Среднеколымска (данные с 1934 г.). Колыма судходна от устья реки Бахапча (регулярное судходство – от Сеймчана); навигация 4–5 мес. Аналогичным образом производится выявление наличия тренда, сглаживание временных рядов для рек Колыма в районе Среднеколымска и Вилюй в районе с. Сунтар. Подборка коэффициентов и выбор моделей тренда осуществляется на основании метода наименьших квадратов. После удаления тренда необходимо провести анализ временного ряда на стационарность. К ряду остатков применяем гармонический анализ. Суммарный прогноз строится с учетом тренда и экстраполированных значений ряда Фурье.



а)



б)

Рис. 1. а) исходные данные (синим) и тренд (красным) среднегодовых расходов воды на реке Яна в районе Верхоянска; б) исходные данные (синим) и гармоническая составляющая (красным) на реке Колыма в районе Среднеколымска

Таблица 1

Таблица относительной погрешности прогностических моделей

Участки рек	2012			2013			2014			2015		
	Факт	Прог.	Ош. %	Факт.	Прог.	Ош. %	Факт.	Прог.	Ош.	Факт	Прог.	Ош. %
Яна в районе Верхоянска	209	204	2	166	190	14	125	161	28	188	171	9
Колыма в районе Среднеколымска	2460	2671	8	3410	2748	19	3450	2839	17	2040	2639	29
Виллой в районе Сунтар	629	684	8	565	581	3	859	659	23	1070	816	24

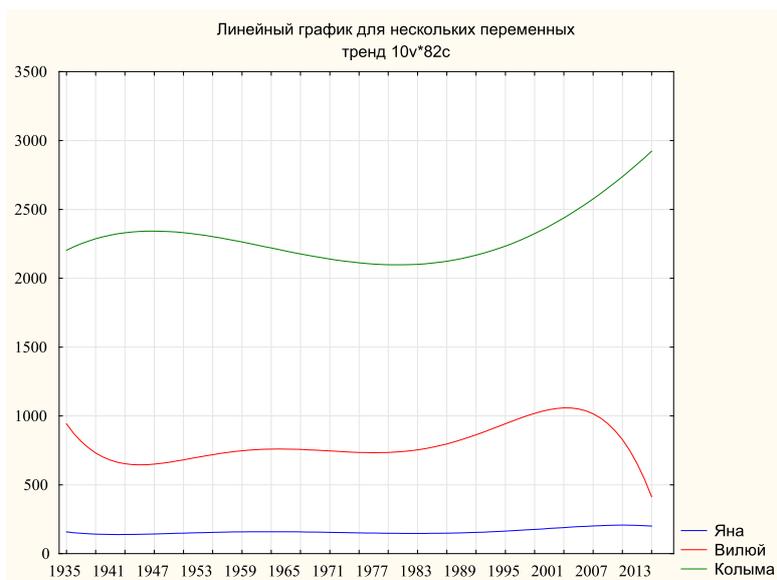


Рис. 2. Тренды временных рядов среднегодовых расходов воды рек Яна, Вилюй и Колыма в районе Верхоянска, Среднеколымска и Сунтар соответственно

Среднегодовые расходы воды на реке Вилюй в районе Сунтар (данные с 1932 г). Река Вилюй – это самый длинный приток реки Лены. Регулярное судоходство осуществляется до посёлка Сунтар. Циклическая составляющая ряда остатков строится на основании результатов гармонического анализа. Суммарный прогноз строится с учетом тренда и экстраполированных значений ряда Фурье. Результаты расчетов и оценка погрешностей представлены в табл. 1.

Адекватность построенных моделей прогнозирования оценивается путем сравнения фактических и предсказанных значений. Полученные значения относительной погрешности говорят о среднем уровне точности построенных моделей.

Степень синхронности или асинхронности колебаний среднегодовых расходов воды рек была определена с помощью метода парной корреляции, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции среднегодовых расходов воды рек Яна, Колыма и Вилюй в районе Верхоянска, Среднеколымска и Сунтар соответственно

№ п/п	Участки рек	1	2	3
1	Яна в районе Верхоянска	1	0,34	0,17
2	Колыма в районе Среднеколымска	0,34	1	0,04
3	Вилюй в районе Сунтар	0,17	0,04	1

Анализ коэффициентов корреляции среднегодовых расходов воды рек Яна, Колыма и Вилюй в районе Верхоянска, Среднеколымска и Сунтар соответственно показывает, что корреляция между ними очень слабая, синхронность данных рек практически отсутствует. При установлении синхронности, асинхронности и цикличности колебаний расходов воды рек используются различные показатели и методы. В данной работе кроме метода парной корреляции использовался также графический – сравнение временных трендов среднегодовых расходов воды, который показал асинхронность рек Вилюй и Колыма, коэффициент парной корреляции этих рек равен 0,04. На графике можно отметить, что наиболее маловодные годы реки Колыма совпадают многоводному периоду на реке Вилюй и наоборот (рис. 2).

Заключение

Одним из методов вероятностно-статистического аппарата, который подходит для прогнозирования изменений многолетних колебаний среднегодовых расходов воды, является метод гармонического анализа временных рядов. Предложенный подход позволяет получать прогнозные оценки многолетних колебаний среднегодовых расходов воды на определенный промежуток времени и получать модели изучаемого процесса (тренда, гармонической и случайной составляющих). Степень синхронности или

асинхронности колебаний среднегодовых расходов воды рек определялась с помощью метода парной корреляции. Установлено, что в многолетних колебаниях среднегодовых расходов воды исследованных рек синхронность выражена слабо. Но в некоторых случаях коэффициент парной корреляции может оказаться недостаточной характеристикой синхронности колебаний водности, так как коэффициент корреляции определяется на основании всего ряда среднегодовых расходов воды и является усредненной характеристикой. Поэтому в данной работе кроме метода парной корреляции использовался также графический – сравнение временных трендов среднегодовых расходов воды, который показал асинхронность рек Вилюй и Колыма. Предложенный метод может быть полезен для прогнозирования закономерностей колебания уровня воды на реках Севера.

Список литературы / References

1. Картвелишвили Н.А. Стохастическая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 200 с.
2. Болгов М.В., Коробкина Е.А. Закономерности многолетних колебаний годового стока рек Сибири и Дальнего Востока // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 5–11. DOI: 10.1134/S1875372811020016.
3. Bolgov M.V., Korobkina E.A. The regularities of long-term annual stream runoff fluctuations in Siberia and the Far East // Geography and Natural Resources. 2011. V. 32. No 2. P. 101–107. DOI: 10.1134/S1875372811020016.
3. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Экстремальные гидрологические ситуации. М.: Медиа-ПРЕСС, 2010. 464 с.
4. Koronkevich N.I., Baranova E.A., Zaytseva I.S. Extreme hydrological situations. M.: Media-Press. 2010, 464 p. (in Russian).
4. Бураков Д.А. Разработка технологии долгосрочного и краткосрочного прогнозирования сценариев развития паводковой обстановки и возникновения ЧС на опасных участках рек Енисей и Ангара в 2002 г. Выдача прогноза до начала и в ходе паводков // Отчет по объекту. Красноярск: Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СУГМС), Красноярский научно-исследовательский центр, 2002. 27 с.
5. Burakov D.A. Development of technology for long-term and short-term forecasting scenarios of development of flood situation and emergencies in dangerous areas of the rivers Yenisei and Angara in 2002. The results of the prediction before and during flood events // The report object. Krasnoyarsk: Sredne-sibirskoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushey sredy, Krasnoyarskiy nauchno-issledovatel'skiy senter, 2002. 27 p. (in Russian).
5. Симонов К.В., Кириллова С.В., Кадена Л. Построение регрессионных моделей на основе нейросетей в задачах экологии человека // Информатизация и связь. 2013. № 5. С. 85–88.
6. Simonov K.V., Kirillova S.V., Kadena L. Construction of regression model based on neural network in the problem of human ecology // Informatizatsiya i svyaz. 2013. № 5. P. 85–88 (in Russian).
6. Kapitonova T.A., Lebedev M.P., Timofeeva V.V., Nogovitsyn D.D., Struchkova G.P. Flood Forecasting on River Lena During Spring High Water in Area of Location of Potentially Dangerous Object // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016). Book 3. Water Resources, Forest, Marine and ocean Ecosystems. Conference Proceedings, 2016. V. 1. P. 329–334.
7. Симонов К.В., Москвичев В.В. Статистические модели опасности наводнений // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. № 4. С. 11–20.
8. Simonov K.V., Moskvichov V.V. The statistical models of the estimation of flood's risks // Problemy bezopasnosti i chrezvy'chajny'x situacij. 2008. № 4. P. 11–20 (in Russian).
8. Стручкова Г.П., Тимофеева В.В., Капитонова Т.А. Статистическая модель наводнения в период весеннего половодья и ледохода на р. Лена у г. Якутска // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 84–89.
9. Struchkova G.P., Timofeeva V.V., Kapitonova T.A. The statistical model of floods during spring tides and ice drift on the Lena River near Yakutsk // Russian Meteorology and hydrology. 2015. No 5. P. 343–346. DOI: 10.3103/S1068373915050088.