

ИССЛЕДОВАНИЯ В БАССЕЙНЕ БАЙКАЛА

УДК 556.06 + 519.237

DOI: 10.15372/GIPR20210107

А.В. ИГНАТОВ*, Н.Н. ЗАВАЛИШИН**

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, ignatov@irigs.irk.ru

**Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт Росгидромета Министерства природных ресурсов и экологии РФ, 630009, Новосибирск, ул. Советская, 30, Россия, znn@sibnigmi.ru

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МОДЕЛИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛЕЗНОГО ПРИТОКА В ОЗЕРО БАЙКАЛ

Сделана попытка построить модели, аппроксимирующие собственные статистические свойства полезного притока в оз. Байкал и его взаимосвязи с потенциальными предикторами, позволяющие получать те или иные его прогнозные оценки. Решение задачи состоит из двух частей. В первой части строятся физико-статистические модели, отражающие известные закономерности формирования стока с водосбора. Эти закономерности проявляются в наличии значимых регрессионных взаимосвязей между прогнозируемым значением месячного притока и его гидрометеорологическими предикторами. Построенные модели могут быть использованы для предсказания среднего полезного притока на очередной месяц. Прогностическая поправка на межгодовую изменчивость к среднему многолетнему сезонному ходу притока в этих моделях формируется за счет учета такой изменчивости в известных к моменту составления прогноза значениях предикторов. Вторая часть задачи посвящена исследованию наличия возможных трендов и циклов в межгодовой изменчивости полезного притока в наиболее многоводном, третьем квартале года в целях попытки его прогнозирования с заблаговременностью в один год и более. Показано, что различные модели циклов с подбираемыми по обучающей выборке параметрами не обеспечивают устойчивость решения на контрольной выборке. Наилучший результат показала модель цикличности с принудительно заданными периодами, отражающая возможное воздействие на изменчивость притока, обусловленное гравитационным влиянием на Землю и Солнце Луны и больших планет. Тем не менее и эту модель из-за небольшой доли объясняемой дисперсии и ограниченности имеющихся данных по притоку пока нельзя признать статистически значимой.

Ключевые слова: полезный приток, закономерности изменчивости притока, стохастическое моделирование, устойчивость решения, прогноз.

A.V. IGNATOV*, N.N. ZAVALISHIN**

*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, ignatov@irigs.irk.ru

**Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute, Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 630009, Novosibirsk, ul. Sovetskaya, 30, Russia, znn@sibnigmi.ru

REGULARITIES AND MODELS OF VARIABILITY IN USEFUL INFLOW INTO LAKE BAIKAL

An attempt has been made to construct models that approximate the time-series statistical properties of the useful inflow into Lake Baikal and its relationships with potential predictors permitting predictive assessments to be obtained. The solution of the problem consists of two parts. In the first part, physical and statistical models are constructed, which reflect the known regularities of the formation of runoff from the catchment. These patterns are manifested in the presence of significant regression relationships between the predicted value of the monthly inflow and its hydrometeorological predictors. The models thus constructed can be used to forecast the average useful inflow for the next month. The predictive correction for interannual variability

ity to the seasonal wave of the inflow in these models is formed by taking into account such a variability in the values of the predictors known at the time of forecasting. The second part of the research is devoted to the study of the presence of possible trends and cycles in the interannual variability in useful inflow in the most water-abundant third quarter of the year in order to try to predict it with a lead time of a year or more. It is shown that various models of cycles with parameters estimated by using of the training sample do not provide the stability of the solution on the control sample. The best result was shown by a cyclical model with fixed periods, reflecting the possible impact on the inflow variability provided by gravitational influence of the Moon and major planets on the Earth and the Sun. Nevertheless, this model cannot also be considered statistically significant due to the small share of the explainable variance and the data deficit on useful inflow into Baikal.

Keywords: *useful inflow, regularities of inflow variability, stochastic modeling, solution stability, forecast.*

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших практических гидрологических задач, относящихся к оз. Байкал, является прогнозирование характеристики, называемой полезным притоком. Прогностические оценки ожидаемого значения этой переменной на ближайшие месяцы или кварталы текущего или следующего года могут быть использованы при уточнении режима регулирования расхода воды через Иркутскую ГЭС, а также через другие ангарские гидроэлектростанции [1, 2].

Любой научно обоснованный прогноз основывается на установленных к моменту его составления закономерностях временной изменчивости прогнозируемой характеристики. Такие закономерности проявляются в наличии устойчивых во времени свойств поведения самой этой переменной или в ее взаимосвязях с другими переменными, называемыми ее предикторами. Простейший, но наименее точный прогноз строится как оценка безусловного распределения вероятностей для значений соответствующей переменной по данным наблюдений об ее изменчивости в прошлом. Более точные прогнозы ищутся как условные оценки прогнозируемых переменных в зависимости от значений их предикторов. Математическая структура оператора, описывающего зависимость прогнозируемой характеристики от ее предикторов, может логически выводиться из известных законов, объясняющих такую зависимость, или формулироваться в качестве гипотезы с той или иной степенью неопределенности [3–7]. Уточнение оператора до однозначного алгоритма вычисления прогностической оценки обычно производится с использованием ретроспективных данных о значениях переменных разрабатываемой модели. Дополнительно в рамках этой процедуры производится определение меры доверия к построенной модели, а также ожидаемой точности и надежности результатов расчетов с ее использованием.

Первичный прогноз месячных или квартальных значений притока в Байкал строится путем осреднения соответствующих его значений, наблюдаемых в прошлом. Ожидаемая точность такого прогноза определяется межгодовой изменчивостью прогнозируемых характеристик притока, а его надежность — количеством и качеством имеющихся ретроспективных данных. Улучшить первичный прогноз можно попытаться, если использовать зависимость полезного притока в Байкал от предикторов, отражающих физические закономерности формирования его значений. В качестве таких предикторов могут выступать переменные, характеризующие состояние водосбора озера и прилегающей к нему атмосферы в период, предшествующий моменту составления прогноза. Подобные закономерности используются для построения моделей, позволяющих по заданным значениям предикторов уточнять (по сравнению со средней многолетней сезонной волной) прогнозные оценки полезного притока. Заблаговременность прогнозов по таким моделям обычно составляет величину от одного до нескольких месяцев.

В настоящей работе предпринята попытка построить модели, аппроксимирующие собственные свойства полезного притока в оз. Байкал или его взаимосвязи с потенциальными предикторами, позволяющие получать те или иные прогнозные оценки его месячных или квартальных значений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленной задачи использованы сведения о полезном среднем месячном притоке в Байкал за 1904–2018 гг. Материалами исследования послужили данные из системы «Кассандра-Сибирь» [8], относящиеся к периоду с 1933 по 2018 г. Другие сведения по полезному месячному притоку за 1904–2012 гг. были взяты из «Правил использования водных ресурсов Иркутского водохранилища и озера Байкал» [9] и переданы авторам В.Н. Синюковичем. Перекрестное сравнение данных из двух этих источников выявило определенное их различие, но его можно считать не критичным для нашей задачи. Более качественными материалами по полезному притоку в Байкал следует считать данные, относящиеся к периоду после середины 1950-х гг., когда в связи со строительством плотины Иркутской ГЭС появился более точный метод измерения этого параметра.

Сведения о возможных метеорологических предикторах полезного притока были взяты из материалов о средних месячных температурах и месячных суммах осадков, зарегистрированных на 26 метеостанциях Восточной Сибири. Кроме того, в задаче использовались данные о числах Вольфа и параметрах, характеризующих положение в пространстве Луны и больших планет.

Для решения задач моделирования нами были использованы алгоритмические инструменты, включенные в программу «Стохастическое моделирование» [10]. Применение модели для расчетов осуществляется с использованием этого же программного продукта непосредственно после ее построения или после повторной загрузки необходимых исходных данных и предварительно сохраненного ранее описания модели из специального файла.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРЕДНЕГО ПОЛЕЗНОГО МЕСЯЧНОГО ПРИТОКА В БАЙКАЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ О ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА И ОСАДКАХ НА МЕТЕОСТАНЦИЯХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Поскольку средний месячный приток в Байкал в определенной мере зависит от характеристик состояния его водосбора и прилегающей к нему атмосферы в период, предшествующий моменту составления прогноза, то на основе используемых в статье данных можно попытаться построить некоторые его прогностические модели. Такие модели будем искать в форме регрессионных зависимостей текущего полезного месячного притока от его значений и значений температуры воздуха и сумм осадков в предшествующие месяцы. В первую очередь искомые модели будем строить для сезона (с мая по октябрь), в который реализуется основной приток в Байкал. При построении моделей, предназначенных для прогнозирования месячного притока, с использованием обучающей (1957–2010 гг.) выборки будем подбирать наиболее подходящую комбинацию его предикторов и аппроксимирующий зависимость от них оператор регрессии. При такой процедуре возможна излишняя подгонка разрабатываемых моделей к данным обучающей выборки, поэтому их предсказательную способность следует также оценивать по независимым материалам. В качестве таких контрольных сведений используем данные о значениях переменных моделей за 1952–1956 и 2011–2018 гг.

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие замечания. Средний по шести построенным моделям для месяцев с высоким притоком коэффициент детерминации на обучающей выборке составляет 0,59. На контрольной выборке аналогичный параметр уменьшается до 0,45. На обеих выборках эта характеристика имеет тенденцию к повышению от весны к осени. Во всех моделях, начиная с модели прогноза июньского притока и кончая моделью для октябрьского притока, в список предикторов прогнозируемой переменной входит приток предыдущего месяца. С июля этот предиктор в прогностических моделях текущего полезного месячного притока становится главным, и его вклад возрастает в направлении от лета к осени. Присутствие этого предиктора в статистических моделях и его роль вполне согласуются с физическими представлениями формирования стока с большого водосбора, каким можно считать водосбор оз. Байкал. Прочие входящие в модели предикторы являются статистическими индикаторами особенностей формирования такого

Таблица 1

Параметры, характеризующие исходные данные о полезном притоке в Байкал и точность моделей прогнозирования его средних месячных значений

Месяц, для которого построена модель полезного притока	Обучающая выборка (1957–2010 гг.)				Контрольная выборка (1953–1956 и 2011–2018 гг.)	
	m	σ	k	s/ σ	k	s/ σ
Май	2992	620	0,43	0,75	0,04	0,98
Июнь	4783	1017	0,65	0,59	0,14	0,93
Июль	4670	1387	0,48	0,72	0,51	0,70
Август	4173	1319	0,40	0,78	0,51	0,70
Сентябрь	2849	979	0,73	0,52	0,89	0,33
Октябрь	1145	457	0,85	0,39	0,59	0,64
Среднее (по всем моделям) значение			0,59	0,62	0,45	0,71

Примечание. m – среднее многолетнее значение притока на обучающей выборке; σ – стандартное отклонение притока на обучающей выборке; s – среднеквадратичная ошибка аппроксимации фактического притока модельным средним; k – коэффициент детерминации.

стока в зависимости от метеорологических условий на этом водосборе в предшествующий моменту составления прогноза период. В их выборе и включении в модели наряду с объективным физическим обоснованием, вытекающим из генезиса формирования стока, есть элемент случайности. Наличие такой случайности отражается в уменьшении средней точности аппроксимации контрольной выборки по сравнению с точностью аппроксимации обучающей выборки. В каждый же отдельный месяц это соотношение может не выполняться за счет флуктуаций статистических оценок сравниваемых параметров, вычисляемых на ограниченных выборках. Результаты моделирования, более подробно иллюстрирующие точность аппроксимации полезного притока математическим ожиданием его модельной оценки в различные месяцы многоводного сезона года, представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Если аналогичным образом строить модели месячного притока с заблаговременностью более одного месяца, то точность соответствующих прогнозов уменьшается. Например, для августа отношение s/σ на контрольной выборке для прогноза с заблаговременностью в два месяца возрастает с 0,7 до 1,18, а для сентября — с 0,33 до 0,49.

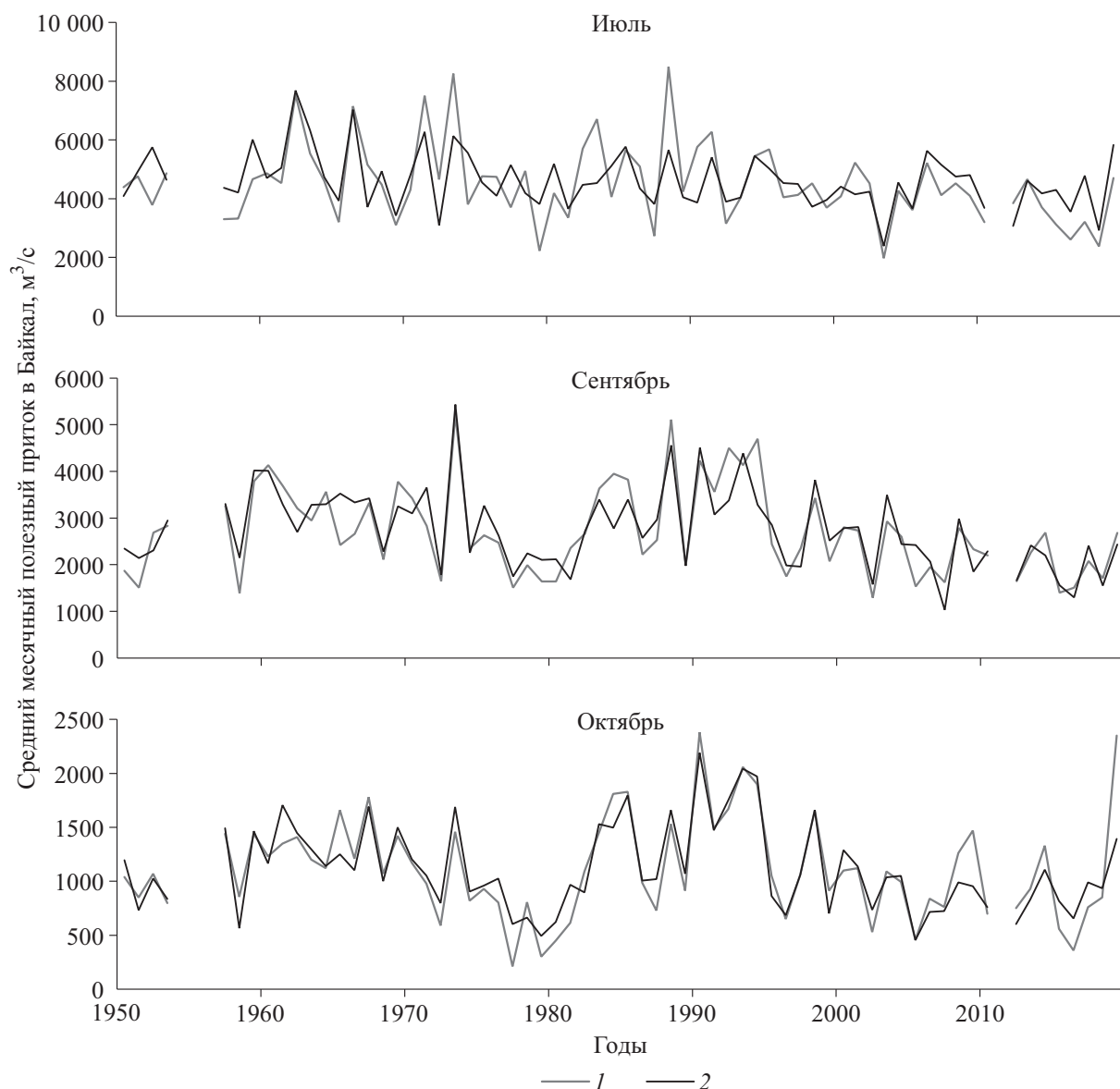


Рис. 1. Аппроксимация фактического (1) среднего месячного полезного притока в Байкал (м³/с) средним значением его расчетной (2) оценки по модели прогнозирования на один месяц вперед. Участок в центре — обучающая выборка (1957–2010 гг.), участки с краев (отделены разрывами графиков) — контрольная выборка (1953–1956 и 2011–2018 гг.).

Если в список возможных предикторов включить температуру и осадки текущего месяца и найти оптимальные по заданному критерию модели, то точность аппроксимации полезного притока его модельной оценкой увеличивается. Средний коэффициент детерминации на обучающей выборке в таких моделях возрастает с 0,59 до 0,74, а на контрольной — с 0,45 до 0,62. Однако для того чтобы использовать эти модели для прогноза, необходимо иметь предсказания значений предикторов, относящиеся к временному интервалу определения значения прогнозируемого полезного притока.

Что же касается периода с низким полезным притоком (с ноября по апрель), то лучшая предсказательная способность реализуется для моделей притока в феврале и марте. В эти месяцы основным фактором, определяющим его межгодовую изменчивость, является накопленная к началу зимнего периода влага на водосборе. В прочие же месяцы преобладающей является текущая метеорологическая ситуация, определяющая интенсивность речного притока (апрель) или испарения (ноябрь—январь) с открытой поверхности озера.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕЖГODOVOЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КВАРТАЛЬНОГО ПРИТОКА

В рассмотренных выше задачах в основе предсказательной способности построенных моделей лежат физические законы сохранения, трансформации и транзита воды на водосборе озера. Наличие таких закономерностей проявляется в существовании прогностических связей полезного притока с его потенциальными гидрометеорологическими предикторами. Использование этих связей позволяет несколько уточнить ожидаемые (в ближайшие месяцы от момента формирования значений всех предикторов в модели) месячные значения притока по сравнению с использованием его средней многолетней сезонной волны в качестве прогнозной оценки.

Если пытаться строить прогнозы полезного притока в Байкал заблаговременностью год и более, то необходимо искать неизвестные закономерности, которым может подчиняться его межгодовая изменчивость на соответствующих масштабах времени. Такой поиск можно осуществлять путем высказывания некоторых формальных предположений (чаще всего в подобных задачах это предположения о скрытых трендах и циклах [11–14]) и их статистической проверки на данных о значениях этой переменной в прошлом. Например:

- В рамках медленно изменяющейся климатической ситуации на Земле в межгодовой динамике полезного притока в Байкал могут наблюдаться достаточно устойчивые локальные или глобальные тенденции. Это позволяет уточнять прогноз притока на ближайшие несколько лет путем экстраполяции таких тенденций.

- В климатической системе Земли имеются положительные и отрицательные обратные связи, которые могут обуславливать существование собственных частот, проявляющихся в наличии устойчивых или неустойчивых циклических компонент с определенными периодами в наблюдаемой изменчивости полезного притока.

- Изменчивые внешние электромагнитные, корпускулярные и гравитационные воздействия на Землю со стороны Солнца, Луны и планет могут отражаться во временном ходе притока.

Чтобы проверить перечисленные утверждения, необходимо сформулировать их в определенном формализованном виде и оценить меру доверия к соответствующей гипотетической модели. С учетом смысла высказанных предположений это будут модели возможных трендов, модели возможных циклов и модели возможной зависимости притока от параметров солнечной активности и положения в пространстве Луны и планет. Поскольку физическое обоснование правомерности подобных гипотез представляет определенные трудности, то искомые на их основе математические соотношения следует отнести к классу статистических моделей. Оценка их характеристик и правомерности применения для расчетов требует использования большего количества данных по сравнению с физически обосновываемыми моделями. В связи с этим, чтобы повысить статистическую значимость выводов о справедливости или несправедливости выше сформулированных предположений, мы будем использовать оценки притока за все годы наблюдений, хотя качество этих данных в разное время может быть разным. Принимая во внимание значительное количество возможных вариантов проверяемых гипотез, ограничимся построением и проверкой гипотетических статистических моделей межгодовой изменчивости полезного притока в Байкал только для его средних значений в самом многоводном, третьем квартале года.

Модели трендов. При проверке гипотез о наличии тренда в ряде притока нами было построено две модели (глобальный линейный тренд и оптимизированный по предсказательной способности локальный тренд). Данные о точности аппроксимации притока этими моделями записаны в двух

Таблица 2

**Параметры, характеризующие относительную точность аппроксимации полезного притока
в 3-м квартале года статистическими моделями**

Гипотетическая модель, аппроксимирующая обучающую выборку	Обучающая выборка (1904–2010 гг.)	Контрольная выборка (2011–2018 гг.)
	s/σ	s/σ
Глобальный линейный тренд	0,98	1,09
Оптимизированный локальный тренд	0,98	0,86
Глобальный линейный тренд и три гармоники	0,86	1,03
Локальный тренд и три негармонических цикла	0,82	1,51
Локальный тренд и воздействие Луны и больших планет	0,91	0,67
Линейный тренд и авторегрессионная зависимость	0,96	1,01

Примечание. σ – стандартное отклонение полезного притока на обучающей выборке; s – среднеквадратичная ошибка аппроксимации фактического притока модельным средним.

первых строках табл. 2. Приведенные оценки показывают, что экстраполяция в будущее локального тренда обеспечивает лучший прогноз по сравнению с экстраполяцией глобального линейного тренда. Такое различие может быть обусловлено, в частности, и наличием циклических компонент во временной изменчивости значений полезного притока. Что же касается моделей самих трендов, то ни одну из них нельзя признать статистически значимой.

Аппроксимация ряда притока суммой линейного тренда и трех гармонических компонент с произвольными периодами. При построении такой модели следует помнить, что поверхность критерия ее оптимизации на обучающей выборке в пространстве искомых коэффициентов является полимодальной. Поэтому для определения параметров циклов, обеспечивающих наилучшую аппроксимацию ряда притока, был применен алгоритм, сочетающий случайный поиск начального приближения коэффициентов модели и градиентный метод определения ближайшего экстремума критерия оптимизации из такого приближения. Повторные применения этого алгоритма, приводящие к аппроксимации обучающей выборки с примерно одинаковой точностью (коэффициент детерминации 0,225–0,235), выделяют в ряде значений полезного притока небольшой тренд (3–4 м³/год), наиболее устойчивую гармонику с периодом 26,5–28,5 лет и две менее устойчивые корректирующие гармоники с периодами от 3 до 20 лет. Проверка вариантов этих моделей на контрольной выборке показала (лучший результат приведен в 3-й строке табл. 2), что их способность к аппроксимации межгодовой изменчивости притока не является инвариантом от времени. Поэтому такие модели не рекомендуется применять для его прогнозирования.

Представление ряда притока как комбинации локального тренда и циклов негармонического характера. Возможно, неустойчивость моделей с гармоническими составляющими связана с тем, что фактические периодические компоненты по форме существенно отличаются от синусоиды. Поэтому для их приемлемой аппроксимации требуется использовать повышенное число гармонических функций с разными периодами, фазами и амплитудами. В итоге аппроксимирующая модель (даже всего с тремя гармониками) имеет много подгоняемых к данным параметров и оказывается весьма чувствительной к шумовым вариациям обучающей выборки. Такая ситуация приводит к возрастанию ошибок описания контрольной выборки. Попытка преодолеть эту проблему основывается на прямом поиске негармонических периодических составляющих в динамике временного ряда [15, 16]. Такие составляющие ищутся путем осреднения значений аппроксимируемой переменной, относящихся к одинаковым или близким фазам в цикле с заданным периодом. Для формального решения этой задачи в нашем случае генерировались специальные переменные, задающие для каждого года наблюдений за притоком фазу цикла с периодом в диапазоне от 1,07 года до 42,67 лет. Относительное различие между соседними периодами при такой генерации составляло 3,7 %.

В итоге было сформировано 999 переменных, задающих фазы пробных циклов в каждой их совместной реализации с квартальным полезным притоком. Затем строились многофакторные регрессионные модели зависимости притока от таких фаз и оценивалась их способность к аппроксимации его изменчивости на обучающей и контрольной выборке. В результате этой работы на обучающей выборке было выделено три наиболее подходящих негармонических цикла (25,82, 2,158 и 5,807 лет), которые совместно с локальным трендом позволяют несколько улучшить (см. табл. 2, 4-я строка)

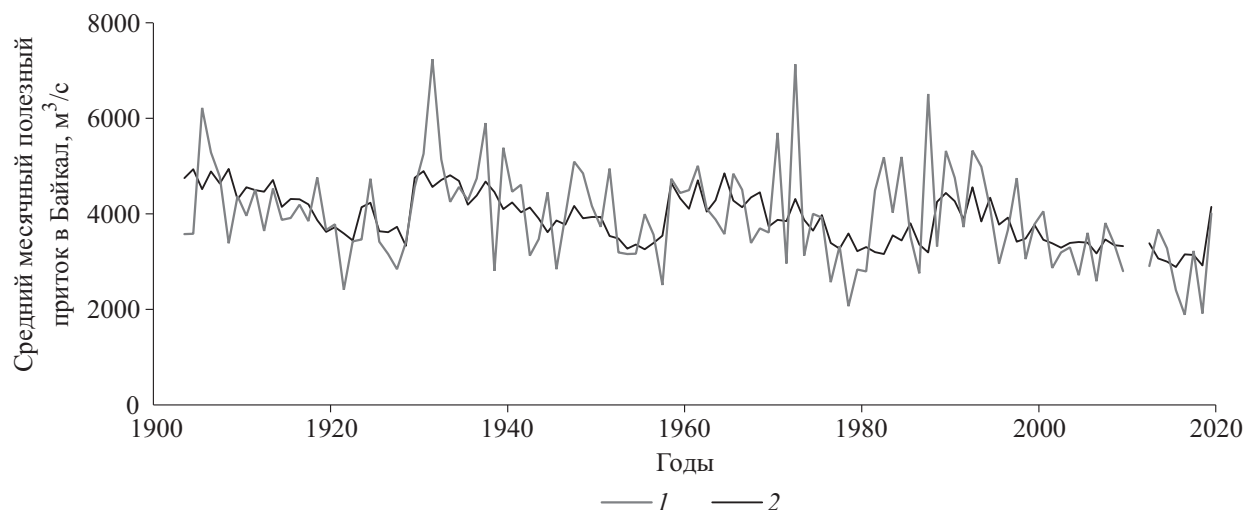


Рис. 2. Аппроксимация (1904–2010 гг.) и контрольный прогноз (отделено разрывом графика) на 8 лет (2011–2018 гг.) квартального полезного притока в Байкал с использованием модели, включающей в список предикторов притока параметры положения Луны и планет на их орбитах.

1 — фактические значения притока; 2 — математическое ожидание расчетной оценки.

аппроксимацию обучающей выборки по сравнению с использованием линейного тренда и трех гармонических циклических компонент. Коэффициент детерминации для этой модели на обучающей выборке имеет значение 0,288, но она также не позволяет успешно предсказать значения притока на контрольной выборке.

Регрессионные модели зависимости притока от положения Луны и планет на их орбитах. Поскольку цикличность в динамике полезного притока может быть сильно зашумлена случайными факторами, то формальный поиск истинных периодических составляющих с произвольными частотами может приводить к сильно неустойчивым результатам. В связи с этим целесообразно проверить гипотезы наличия в изменчивости притока принудительных колебаний с заранее известными частотами. Такую цикличность может формировать гравитационное влияние на Землю и Солнце планет солнечной системы [17, 18]. Положение в пространстве этих космических объектов в данной задаче мы задавали одним параметром — текущей фазой периода обращения по орбите соответствующего небесного тела — и искали регрессионные зависимости притока от таких фаз. Дополнительно в рамках данной задачи мы проверяли возможную зависимость притока от числа Вольфа. Проверка этой группы гипотез (с дополнительным учетом возможного локального тренда) привела к модели, в которой наиболее сильная зависимость притока в третьем квартале наблюдается от положения Луны, Юпитера и Сатурна (см. табл. 2, 5-я строка) на их орбитах. Графически результат аппроксимации данных о притоке этой моделью показан на рис. 2.

Авторегрессионные модели формирования изменчивости полезного притока. Возможно, колебательные вариации с собственными частотами в динамике притока имеют место, но они являются реакцией на спонтанные воздействия и носят затухающий характер. В частности, подобного рода цикличность в изменчивости временного ряда можно моделировать путем построения авторегрессионных зависимостей [19], которые также позволяют непосредственно строить и его прогностические оценки. Поскольку описанные выше исследования показали возможное наличие тренда в динамике притока, то в список возможных предикторов при построении искомой модели в качестве пробного предиктора мы добавляли и время. Оптимальная модель такого типа несколько лучше описывает данные (см. табл. 2, 6-я строка) по сравнению с моделью просто линейного тренда, но она также не обладает достаточной предсказательной способностью для ее практического использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сказать следующее. Уточнение прогноза сезонного хода (по сравнению со средним многолетним значением) полезного притока в оз. Байкал на очередной месяц может быть реализовано путем построения оптимальной регрессионной физико-

статистической модели на основе ретроспективных данных об этом притоке, а также о температуре и осадках на 26 метеостанциях Восточной Сибири в предшествующие месяцы. Поскольку использованные в работе материалы недостаточно подробно отражают гидрометеорологическую ситуацию на водосборе Байкала, то в рамках такой процедуры не удастся достичь максимальной прогностической способности подобного рода моделей. Кроме того, метеорологическая ситуация в месяц, для которого составляется прогноз, заметно влияет на величину текущего полезного притока, что также уменьшает прогностическую способность моделей, использующих в своей структуре только запаздывающие во времени предикторы. В итоге в многоводный период года могут быть рекомендованы только статистически значимые модели для осенних месяцев, в которых основным предиктором является полезный приток предыдущего месяца. Однако если использовать более детальные данные о водосборе и применить более громоздкую технологию моделирования [20, 21], то результаты прогнозирования очередного месячного притока могут быть улучшены.

В маловодный сезон статистически значимыми получились прогностические модели полезного притока в феврале и марте. Основными предикторами в данных моделях являются характеристики, индицирующие осеннее состояние водосбора (полезный приток, температура воздуха и сумма осадков), что позволяет в этом случае строить прогноз с заблаговременностью 2–3 месяца.

Попытка выявить различными статистическими методами наличие трендов и циклов в межгодовой изменчивости полезного притока в Байкал в третьем квартале года не привела к конструктивному положительному результату. Все попытки объяснения наблюдаемой изменчивости притока с помощью таких моделей оказались статистически незначимыми. Наилучший результат для описания и прогноза изменчивости этого притока показала модель с принудительными циклами негармонического характера, связываемыми с периодами обращения по своим орбитам Луны, Юпитера и Сатурна. Однако и в этом случае мера доверия к существованию описываемой данной моделью закономерности не превышает 90 %. Повышение доверия к этой гипотезе или ее опровержение требует дальнейших наблюдений за фактической изменчивостью полезного притока.

Работа выполнена в рамках НИР Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (0347–2016–003) и Договора о научном сотрудничестве между Институтом географии СО РАН и Сибирским региональным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом Министерства природных ресурсов и экологии РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абасов Н.В., Бережных Т.В., Резников А.П. Долгосрочное прогнозирование природообусловленных факторов в энергетике // Системные исследования проблем энергетики. — Новосибирск: Наука, 2000. — С. 415–429.
2. Бендарук С.Е., Мотовилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое строительство. — 2017. — № 7. — С. 22–35.
3. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. — Л.: Гидрометеоздат, 1972. — 192 с.
4. Бураков Д.А. Математическая модель расчета весеннего половодья для равнинных заболоченных бассейнов // Метеорология и гидрология. — 1978. — № 1. — С. 49–59.
5. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. — Л.: Гидрометеоздат, 1988. — 312 с.
6. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. — М.: Наука, 2007. — 280 с.
7. Бураков Д.А., Гордеев И.Н., Игнатов А.В., Петкун О.Э., Путинцев Л.А., Чекмарёв А.А. Прогнозирование притока воды в Красноярское и Саяно-Шушенское водохранилища во втором квартале года // География и природ. ресурсы. — 2016. — № 2. — С. 175–183.
8. Завалишин Н.Н. Инструкция по работе с программными средствами технологии «Кассандра-Сибирь». — Новосибирск: Изд-во СибНИГМИ, 2010. — 45 с.
9. Пояснительная записка к проекту Правил использования водных ресурсов Иркутского водохранилища и озера Байкал [Электронный ресурс]. — <http://pivg.enbv.ru/> (дата обращения 09.09.2019).
10. Игнатов А.В. Руководство пользователя программы «Стохастическое моделирование». — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2019. — 217 с.
11. Jacoby G.C., D'Arigo R.D., Davaajamts T. Mongolian tree-rings and 20th century warming // Science. — 1996. — N 273. — P. 771–775.
12. Scafetta N. A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature // Journ. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2012. — N 74. — P. 145–163.

13. Антонов А.Е., Якушев Д.И. Полигармоническая модель уровня Каспийского моря и долгосрочный прогноз его изменения // Навигация и гидрография. — 2011. — № 31. — С. 60–64.
14. Дроздов О.А., Григорьева А.С. Многолетние циклические колебания атмосферных осадков на территории СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1971. — 316 с.
15. Шерстюков Б.Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. — Обнинск: Всерос. НИИ гидромет. информации — Мировой центр данных, 2008. — 246 с.
16. Шерстюков Б.Г. Изменения, изменчивость и колебания климата. — Обнинск: Всерос. НИИ гидромет. информации — Мировой центр данных, 2011. — 293 с.
17. Сидоренков Н.С. Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы // Природа. — 2008. — № 2. — С. 23–31.
18. Мониин А.С. Влияние планет на климат Земли // Глобальные изменения природной среды. — М.: Научный мир, 2000. — С. 122–128.
19. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. — М.: Мир, 1974. — 406 с.
20. Мотовилов Ю.Г. Система физико-математических моделей формирования речного стока и ее применение для гидрологических расчетов и прогнозов: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — М., 2019. — 42 с.
21. Миллионщикова Т.Д. Моделирование и предвычисление многолетних изменений стока р. Селенги: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М., 2019. — 29 с.

Поступила в редакцию 09.12.2019

После доработки 20.01.2020

Принята к публикации 25.09.2020
