

Е.В. Гайдукова, С.В. Шаночкин

**К МЕТОДИКЕ ОЦЕНКИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛЕТНЕГО
ГОДОВОГО СТОКА ПОЛИЗОНАЛЬНЫХ РЕК СИБИРИ**

E. V. Gaidukova, S. V. Shanochkin

**METHODS OF ESTIMATES OF LONG-TERM CHANGES
OF PROBABILITY CHARACTERISTICS OF PERENNIAL ANNUAL
FLOW OF THE POLYZONAL RIVERS OF SIBERIA**

В статье рассматривается возможность применения известной методологии долгосрочных оценок климатических изменений многолетнего стока, основанной на уравнении Фоккера–Планка–Колмогорова, к полизональным рекам. Ее достоверность подтверждена ретроспективными прогнозами вероятностных характеристик стока крупных рек Сибири, протекающих в нескольких природных зонах.

Ключевые слова: долгосрочная оценка изменений многолетнего стока, вероятностные распределения, полизональные реки Сибири, ретроспективный прогноз.

The possibility of application of the methodology known long-term assessments of long-term climate change, runoff, based on the Fokker–Planck–Kolmogorov to polyzonal rivers. Its validity is confirmed hindcast probability characteristics large rivers of Siberia, occurring in several natural areas.

Key words: long-term estimation of changes of a long-term flow, probability distribution, polyzone rivers of Siberia, retrospective forecast.

Введение

В настоящее время существуют и успешно применяются для решения задач, связанных с долгосрочной оценкой гидрологических последствий изменения климата, стохастические модели формирования многолетнего речного стока (см., например, [1, 2]). Однако до сих пор обоснованность их применения ограничивалась реками с зональным режимом формирования стока, т. е. с площадью водосбора примерно от 1,5 тыс. км² до 50 тыс. км²; при меньших и больших площадях начинают действовать азональные и полизональные факторы формирования стока, не учитываемые используемыми моделями. Поэтому все крупные реки, в частности реки Сибири, выходили за рамки применимости существующей методологии долгосрочного прогноза.

Целью данной статьи является изучение возможности использования стохастической модели формирования многолетнего речного стока, основанной на уравнении Фоккера–Планка–Колмогорова, построенном с использованием линейного формирующего фильтра, для долгосрочной оценки вероятностных характеристик стока полизональных рек Сибири.

Методика исследований

На кафедре гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ была разработана методология долгосрочной оценки гидрологических последствий изменения кли-

мата [3]. В ее основе лежит стохастическая модель формирования многолетнего стока (уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова – ФПК), решением которой является изменение плотности вероятности расходов воды (модуля, слоя) по времени. При моделировании равновесной (статистически установившейся) реакции вод суши на климатические и антропогенные воздействия уравнение ФПК аппроксимируется системой алгебраических уравнений для начальных моментов m_n ($n = 1, 2, 3$).

При проведении долгосрочной оценки вначале по рядам наблюдений вычисляются m_n , затем производится параметризация уравнений для моментов – находятся численные значения параметров, отвечающие за формирование плотности вероятности и связанные с физико-географическими свойствами бассейна. Затем найденные параметры изменяются за счет факторов подстилающей поверхности или/и за счет климата. Далее производится вычисление новых оценочных моментов m_n , по которым определяются расчетные гидрологические характеристики (норма, коэффициенты вариации и асимметрии).

Ретроспективная оценка вероятностных характеристик стока полизональных рек

На первом этапе для достижения сформулированной цели были созданы базы данных по стоковым характеристикам и осадкам для бассейнов крупных рек Сибири. Выбраны четыре бассейна – р. Обь, р. Енисей, р. Лена, р. Индигирка. Информация представлена в табл. 1; площади водосборов (F) больше 50 000 км², период наблюдений за расходами воды с 1941 по 1980 г. Реки характеризуются большим стоком [при модулях стока q , меняющихся от 4,41 до 10,9 л/(с·км²)], малыми коэффициентами вариации (C_v), соотношением C_s/C_v в среднем равным 2,5 (C_s – коэффициент асимметрии). Также были собраны данные по осадкам по 34-м метеостанциям, расположенным в пределах бассейнов рассматриваемых рек.

На втором этапе была произведена оценка текущего вероятностного режима полизональных рек с целью обоснования возможности использования одно-модальных распределений семейства кривых К. Пирсона, к которым приводят стохастические модели формирования многолетнего стока, используемые в рассматриваемой методике. Их успешное использование для прогноза вероятностных распределений полизональных рек позволит утверждать о применимости существующей методологии долгосрочного прогнозирования к крупным рекам. Для этого были построены гистограммы эмпирических частот и кривые обеспеченности по всем рассматриваемым створам. По критерию Колмогорова оценена согласованность эмпирических кривых обеспеченностей с теоретической кривой Пирсона III типа. Несмотря на то, что семь гистограмм выбранных створов имеют (при визуальной оценке) двумодальные распределения, для всех створов кривая Пирсона согласуется с эмпирическими распределениями при уровнях значимости 5 и 10 %.

Информация по выбранным бассейнам крупных рек Сибири

№ п/п	Река – пост	F , км ²	q , л/(с·км ²)	C_v
1	Обь – с. Фоминское	98 200	10,9	0,15
2	Обь – г. Барнаул	169 000	8,09	0,19
3	Обь – г. Камень-на-Оби	216 000	7,80	0,13
4	Обь – г. Колпашево	486 000	8,97	0,15
5	Обь – д. Прохоркино	738 000	7,99	0,13
6	Обь – с. Белогорье	2 165 000	5,41	0,14
7	Обь – г. Салехард	2 432 000	5,71	0,13
8	Енисей – г. Кызыл	115 000	8,77	0,12
9	Енисей – п. Никитино	182 000	8,03	0,13
10	Енисей – с. Енисейск	1 400 000	5,61	0,10
11	Енисей – д. Подкаменная Тунгуска	1 760 000	6,01	0,09
12	Енисей – г. Игарка	2 440 000	7,30	0,07
13	Лена – д. Змеинова	140 000	7,74	0,16
14	Лена – с. Крестовское	440 000	8,90	0,15
15	Лена – с. Солянка	770 000	7,85	0,14
16	Лена – с. Табага	897 000	7,13	0,13
17	Лена – с. Кюсюр	2 430 000	6,53	0,11
18	Инди́гирка – гм. ст. Юрты	51 100	4,41	0,18
19	Инди́гирка – пос. Инди́гирский	83 500	5,21	0,22

Следующий этап заключался в выполнении ретроспективных прогнозов по существующим рядам стока и осадков, доказывающих обоснованность применимости методики.

С помощью разностно-интегральных кривых и критерия Стьюдента ряды наблюдений были поделены таким образом, чтобы разность между средними расходами была максимальной, т. е. были выделены маловодные и многоводные периоды [1, 4]. Нормы годовых осадков на каждую половину ряда рассчитывались тремя методами: среднего арифметического, квадратов, а также находилась та метеостанция, ряд по осадкам которой соотносился с рядом стока с большим коэффициентом корреляции (метод корреляции осадков со стоком). Использование этих методов обосновано их практической применимостью с наименьшими трудозатратами при практических прогнозах.

Ретроспективные прогнозы (имитирующие долгосрочные оценки вероятностных распределений) давались с первого периода (многоводного/маловодного) на второй (маловодный/многоводный) и наоборот; всего 38 прогнозов. Результаты прогнозов с первого хронологического периода на второй представлены в табл. 2.

В табл. 2 показаны отклонения относительных «прогнозных» характеристик стока от фактических при использовании норм осадков, вычисленных различными способами. Больше число лучших результатов дает прогноз с использованием осадков, определенных методом корреляции со стоком. Отклонения, превышающие 10 %, наблюдаются в основном, у створов, имеющих двумодальные гистограммы.

По критерию Колмогорова была оценена степень согласия фактических кривых распределения с прогнозными при уровнях значимости 5 и 10 %. При уровне значимости 5 % получено, что при прогнозе с маловодного периода на многоводный нулевая гипотеза о соответствии кривых не опровергается в 13 случаях, при прогнозе с многоводного периода на маловодный – в 11 случаях. В процентном соотношении, соответственно, оправдалось (т. е. максимальное отклонение фактических и прогнозных обеспеченных расходов воды не превышает критического значения) 68 и 57 % прогнозов. При уровне значимости 10 % при прогнозе с маловодного периода на многоводный оправдалось 63 % прогнозов, при прогнозе с многоводного периода на маловодный – 57 %.

Таким образом, от общего числа прогнозов процент оправдавшихся прогнозов составляет 63 % при пятипроцентном уровне значимости. При уровне значимости 10 % процент оправдавшихся прогнозов уменьшается до 60 %. Причем согласованность фактических и прогнозных кривых распределения свойственна створам, замыкающих площади водосборов не выше 200 тыс. км² (процент оправдавшихся прогнозов составляет 93 %), исключение составляет створ на реке Обь – с. Фоминское с площадью водосбора 98 200 км².

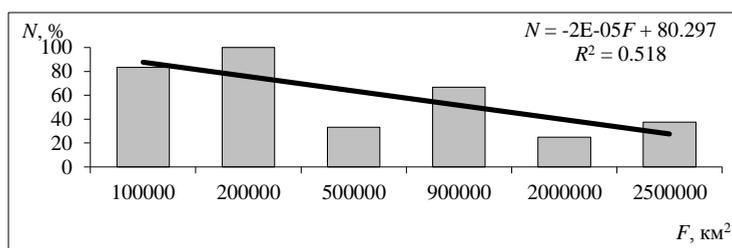
Таблица 2

Отклонения оценочных характеристик от фактических при ретроспективном прогнозе с использованием норм осадков, вычисленных различными способами, и результаты оценки согласия распределений по критерию Колмогорова

Река – пост	Методы вычисления осадков						Оценка по критерию Колмогорова	
	по корреляции		квадратов		ср. арифмет.		уровень значимости, %	
	$\Delta q, \%$	$\Delta C_p, \%$	$\Delta q, \%$	$\Delta C_p, \%$	$\Delta q, \%$	$\Delta C_p, \%$	5/10*	5/10**
Обь – с. Фоминское**	-11,3	40,7	1,4	31,0	0,0	32,0	-/-	+/+
Обь – г. Барнаул**	-7,5	22,7	5,7	11,9	4,2	13,0	+/+	+/+
Обь – г. Камень-на-Оби*	-23,0	100	-9,9	36,9	-10,3	38,0	-/-	-/-
Обь – г. Колпашево*	-16,7	-1,8	-20,1	2,4	-20,4	2,8	-/-	-/-
Обь – д. Прохоркино*	-11,5	20,9	-17,0	27,8	-17,3	28,2	-/-	-/-
Обь – с. Белогорье*	-13,4	0,0	-16,5	4,1	-17,9	6,1	+/+	-/-
Обь – г. Салехард*	-10,9	21,4	-11,6	23,2	-13,1	26,9	+/-	-/-
Енисей – г. Кызыл**	0,3	32,8	-0,6	31,8	0,5	32,9	+/+	+/+
Енисей – п. Никитино**	4,2	1,6	1,9	0,5	3,0	1,0	+/+	+/+
Енисей – с. Енисейск*	-8,1	-11,3	-8,7	-11,9	-8,1	-11,3	-/-	-/-
Енисей – д. П. Тунгуска**	-5,6	-23,4	0,4	-27,0	0,5	-27,1	+/+	-/-
Енисей – г. Игарка**	-3,2	39,6	5,3	30,8	6,4	29,7	-/-	-/-
Лена – д. Змеинова**	-4,6	-11,3	-0,4	-18,1	-2,2	-15,3	+/+	+/+
Лена – с. Крестовское**	-4,7	-26,9	-2,3	-28,2	-4,1	-27,2	+/+	+/+
Лена – с. Солянка**	2,4	-26,2	4,4	-25,8	2,4	-26,2	+/+	+/+
Лена – с. Табага**	2,0	-12,8	3,9	-12,5	2,0	-12,8	+/+	+/+
Лена – с. Кюсюр **	-4,9	-28,8	-0,9	-27,8	-2,8	-28,3	+/+	+/+
Индиگیرка – ст. Юрты**	7,5	25,5	6,0	25,7	7,5	25,5	+/+	+/+
Индиگیرка – пос. Индиگیرский*	4,7	4,6	-7,9	-4,3	-6,9	-3,8	+/+	+/+

Примечания: * – ретроспективный прогноз с маловодного периода на многоводный; ** – ретроспективный прогноз с многоводного периода на маловодный.

Выполненная оценка качества ретроспективных прогнозов позволяет предположить, что применяемая стохастическая модель формирования стока эффективна при прогнозе вероятностных характеристик стока полизональных рек с площадью водосбора до 200 тыс. км² (см. рис.). На рисунке показана гистограмма, показывающая зависимость процента оправдавшихся прогнозов (N) от площади водосбора (F). Проведена аппроксимирующая линия, коэффициент детерминации равняется 0,52 ($R = 0,72$). Подобную зависимость можно объяснить тем, что на больших площадях для описания процесса формирования годового стока не совсем подходит модель, основанная на линейном фильтре, т. е. нужна нелинейная модель или модель, которая учитывает дополнительные (помимо расхода воды) фазовые переменные.



Зависимость оправдавшихся прогнозов (N) от площади водосбора (F)

Выводы

Рассмотренные ретроспективные прогнозы вероятностных характеристик стока полизональных рек являются, при значительных площадях, неудовлетворительными. Прогнозы можно, по-видимому, перевести в статус удовлетворительных, если, во-первых, прогнозировать сток полизональных рек с площадью водосбора не более 200 тыс. км²; во-вторых, при прогнозной оценке параметры модели делать зависимыми от физико-географических или климатических характеристик [3]; в-третьих, использовать при параметризации прогнозной модели нормы осадков той метеорологической станции, на которой коэффициент корреляции наблюдаемых осадков со стоком наибольший.

Литература

1. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В., Хаустов В.А., Громова М.Н., Девятков В.С., Шевнина Е.В. Влияние изменения климата на многолетний слой стока весеннего половодья рек Арктической зоны России // Уч. зап. РГГМУ, 2010, № 14, с. 14–19.
2. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Девятков В.С. Фоновое прогнозирование процесса формирования суточных вероятностных стоковых характеристик // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 18, с. 10–20.
3. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов. Изд. 2-е, испр. и доп. – СПб.: РГГМУ, 2006. – 559 с.
4. Шевнина Е.В. Параметризация модели формирования стока весеннего половодья на территории Российской Арктики // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 21, с. 38–46.

Исследования финансировались Министерством образования и науки Российской Федерации (гранты № 5.3400.2011, 14.В37.21.0678).