

УДК 556.5.072:556.164.001.18"403"(23-574)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА
ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ВОДНОСТИ
ГОРНЫХ РЕК КАЗАХСТАНА**

Канд. геогр. наук В.В. Голубцов

Канд. техн. наук В.И. Ли

В.П. Попова

Т.П. Строева

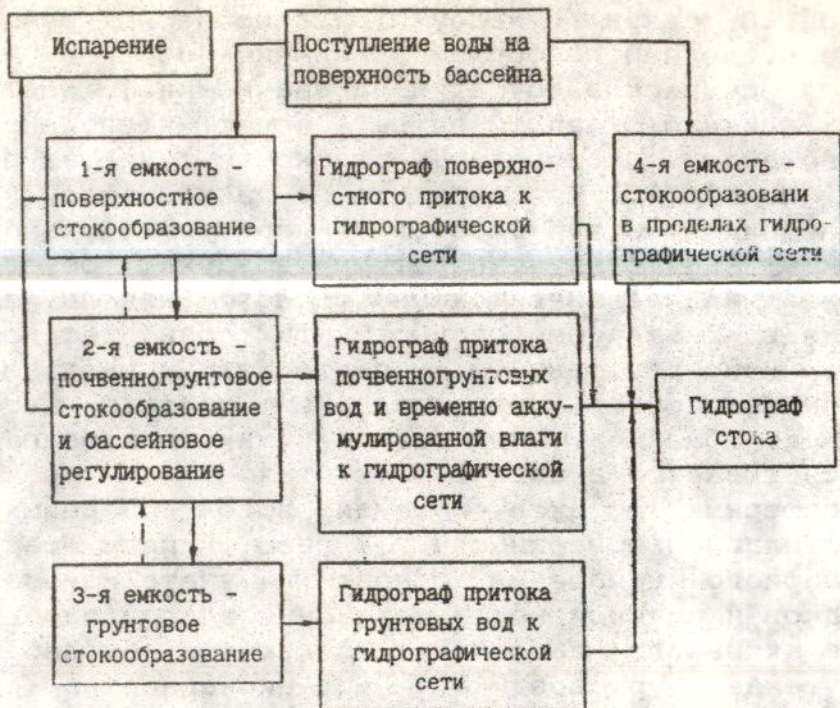
На примере ряда рек северо-западного склона Джунгарского Алатау и юго-западного склона хр. Каратау показана возможность разработки методик краткосрочных прогнозов водности горных рек Казахстана на основе использования модели формирования стока. Приведены результаты оценки разработанных методик.

Прогнозы водности рек являются одной из важнейших составных частей гидрометеорологического обслуживания различных хозяйственных отраслей Республики Казахстан, в первую очередь гидроэнергетики и сельского хозяйства. Эти прогнозы до настоящего времени составляются, в основном, с помощью методик, разработанных на основе использования эмпирических и полуэмпирических методов. Нередко такие методики базируются на ограниченной гидрометеорологической информации и весьма приближенном (косвенном) учете гидрологических процессов, происходящих в бассейнах рек. Поэтому многие из ранее разработанных методик недостаточно обоснованы. Со временем, как правило, они нуждаются в уточнении с привлечением большего объема исходных данных. Кроме того, значительное влияние хозяйственной деятельности на формирование стока, наблюдавшееся особенно в последние десятилетия,

нарушило однородность гидрологических рядов, что в определенной мере создает дополнительные трудности при уточнении существующих методик прогноза водности рек.

С появлением моделей формирования стока появилась возможность для разработки методик прогноза водности рек Казахстана на принципиально новой основе. В качестве методической основы для разработки методик долгосрочного прогноза водности горных рек, как показали исследования [5,9,10], успешно может быть использована усовершенствованная концептуальная математическая модель формирования стока, разработанная в Казахском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте (КазНИГМИ) под руководством В.В.Голубцова [4,6,7]. В данной работе на примере рек северо-западного склона Джунгарского Алатау (Каратал, Коксу, Биже) и юго-западного склона хр.Каратау (Арысь, Шаян) показана возможность использования этой модели для разработки методик краткосрочного прогноза водности горных рек Казахстана.

В модели КазНИГМИ речной бассейн представлен в виде трех последовательно соединенных регулирующих емкостей, расположенных одна над другой и отождествляемых с поверхностным, почвенно-грунтовым и грунтовым стокообразованием, а также емкости, характеризующей стокообразование в пределах гидрографической сети. Модель включает описание отдельных элементарных воднобалансовых процессов (формирования снеготазов и поступления воды на поверхность бассейна, изменения влагозапасов, промерзания и оттаивания почвогрунтов, суммарного испарения; поверхностного, почвенно-грунтового и грунтового стокообразования, формирования притока к русловой сети и гидрографа стока в замыкающем створе), т.е. состоит из нескольких частных моделей. В ее основу положены принципы, изложенные в работах А.Н.Важнова [2], В.Д.Комарова [8], Ю.М.Денисова [1], Ю.Б.Виноградова [3]. Блок-схема модели приведена на рисунке. Ниже дано краткое описание блоков модели.



Общая структура модели формирования стока

Особенностью модели КазНИГМИ, является то, что она позволяет даже при наличии ограниченной исходной информации моделировать сток с каждой высотной зоны, в том числе с различных ландшафтных частей бассейна и склонов различной экспозиции. Параметры модели принимаются изменяющимися в зависимости от высоты местности, уклона и экспозиции горных склонов, характера подстилающей поверхности (открытой, залесенной, ледниковой и т.д.).

В модели формирования снегозапасов и поступления воды на поверхность бассейна учитываются термический режим, вид выпадающих атмосферных осадков, их пространственное изменение, динамика альбедо, плотности и водоудерживающей способности снежного покрова, покрытость снегом отдельных высотных зон, задержание осадков растительным пок-

ровом. В связи с недоучетом атмосферных осадков измерительными приборами в величины осадков вводятся суммарные поправки на смачивание, испарение, влияние скорости ветра. Расчет интенсивности снеготаяния производится с помощью температурных коэффициентов. При переходе от неледниковой зоны к ледниковой учитывается температурный скачок — резкое уменьшение температуры воздуха, обусловленное наличием инверсионного слоя. Модель изменения влагозапасов в почвогрунтах позволяет получать непосредственные характеристики увлажнения речных бассейнов, определяемые с помощью метода водного баланса. При этом динамика влагозапасов рассчитывается в зависимости от хода во времени атмосферных осадков и суммарного испарения с подстилающей поверхности. В свою очередь расчет суммарного испарения основан на учете изменения осадков и интенсивности истощения влагозапасов в зоне активного влагообмена, связанной с колебаниями температуры воздуха, нестационарностью процесса транспирации растительного покрова в течение вегетационного периода и агрогидрологическими свойствами слагающих бассейнов почвогрунтов.

Моделирование глубин промерзания и оттаивания почвогрунтов основано на использовании зависимости этих характеристик от накопленных сумм отрицательных температур воздуха зимой и положительных в весенний период. При этом учитывается также влияние влажности почвогрунтов, высоты и плотности снежного покрова, поступление тепла с нижележащих слоев, солнечной радиации и талых вод.

Поверхностное стокообразование описывается разностью интенсивностей поступления воды на поверхность бассейна и ее инфильтрации в почву. Причем инфильтрация рассматривается как нестационарный процесс, поскольку на нее влияют промерзание и оттаивание почвогрунтов. Эта особенность модели реализуется с помощью инфильтрационного параметра, выраженного через его значение для талых почвогрунтов, относительные влагозапасы в метровом слое и разность между текущей и началь-

ной мощностью слоя промерзания. Дополнительно учитываются интенсивности наполнения емкости начальных потерь, инфильтрации из бессточных понижений и поступления почвенногрунтовых вод на поверхность бассейна в результате переполнения второй регулирующей емкости. Иначе говоря, принимаются во внимание потери воды до начала поверхностного стокообразования и после его завершения, а также выхода почвенногрунтовых вод на дневную поверхность. Определение этих потерь связано соответственно с расчетами дефицитов влажности верхнего слоя почвогрунтов, поверхностной емкости, определение выхода почвенногрунтовых вод - с расчетами потенциального и реального почвенногрунтового стокообразования.

Моделирование почвенногрунтового стокообразования производится по разности интенсивностей поступления воды во вторую регулирующую емкость из первой и инфильтрации из второй емкости в третью. Полученная таким образом величина почвенногрунтового стокообразования является потенциальной. Реальное же почвенногрунтовое стокообразование выражается через потенциальное и через текущий и максимальный дефициты гравитационной влаги во второй емкости.

Интенсивность грунтового стокообразования условно отождествляется с интенсивностью заполнения третьей регулирующей емкости. Она определяется как разность интенсивности инфильтрации из второй емкости в третью и интенсивности потерь влаги на наполнение статических запасов подземных вод или той части динамических запасов последних, которая не выклинивается в замыкающем створе.

Следующий этап моделирования формирования стока в бассейне связан с описанием процесса трансформации интенсивности стокообразования в гидрограф притока воды к гидрографической сети. В качестве приближенной характеристики притока к гидрографической сети принимается сток с элементарных бассейнов, склоновый сток которых концентрируется в одном хорошо выраженном русле. Площадь таких бассейнов может быть установлена в зависимости от густоты гидрографической сети.

Приток воды к гидрографической сети определяется с помощью моделей, разработанных на основе решения дифференциального уравнения изменения во времени динамических запасов воды в бассейне. Это изменение представляет собой разность интенсивности стокообразования и интенсивности притока воды к гидрографической сети, причем между динамическими запасами и притоком грунтовых вод, по данным гидрогеологических исследований, существует линейная зависимость, а для поверхностного притока, согласно имеющимся материалам наблюдений, она существенно нелинейная. Поэтому в модели формирования стока, разработанной в КазНИГМИ, для трансформации интенсивности грунтового стокообразования в гидрограф притока к русловой сети принята линейная модель, для трансформации интенсивности поверхностного стокообразования в гидрограф поверхностного притока - нелинейная модель. Линейная зависимость между динамическими запасами воды в бассейне и притоком к гидрографической сети положена также в основу модели трансформации интенсивности почвенногрунтового стокообразования в гидрограф притока почвенногрунтовых вод.

В связи с представлением речного бассейна в виде системы последовательно соединенных емкостей интенсивность стокообразования трансформируется в гидрограф притока к гидрографической сети отдельно для каждой емкости. Общий приток к гидрографической сети вычисляется путем суммирования его составляющих, а приток со всего бассейна определяется как сумма значений, рассчитанных для высотных зон.

На выходе модели формирования стока получается гидрограф стока в замыкающем створе бассейна и объемы стока за различные календарные периоды (декады, месяцы, год). Для пересчета гидрографа притока к гидрографической сети в гидрограф стока используется интеграл Дюамеля. Основными входными данными для моделирования гидрографа стока являются суточные суммы осадков и средние суточные температуры воздуха на метеорологических станци-

ях, расположенных в пределах бассейна или вблизи от него.

Исследования показали, что описанная выше математическая модель достаточно детально описывает процессы формирования стока в горном бассейне [5,6]. С помощью этой модели можно рассчитывать все основные (практически значимые) элементы водного баланса отдельных высотных зон и всего бассейна. Хорошее и удовлетворительное соответствие ординат наблюдаемых и рассчитанных гидрографов указывает на возможность использования модели в качестве основы для составления краткосрочных прогнозов стока горных рек.

В горной части бассейна р.Каратал по ориентации склонов, доступности их для влажных воздушных масс и высотному положению можно выделить два района: высоко-среднегорный и низкогорный. Первый из них включает водосборы рек Каратал и Коксу без ее левых притоков, стекающих с Алтын-Эмельского хребта. Основная отличительная особенность этого района - западная ориентация и высокое высотное положение речных бассейнов (более 1600 м). Низкогорный район охватывает водосбор р.Бижэ и левые притоки р.Коксу. Район характеризуется северо-западной ориентации речных бассейнов. Средняя высота бассейнов не превышает 1600 м.

Река Каратал образуется в результате слияния рек Кара, Чижэ и Текели, берущих начало в центральных массивах Джунгарского Алатау на высоте 3500-4000 м. Бассейн р.Каратал до гидрологического поста в с.Каратальское, по данным которого разрабатывалась методика, расположен в диапазоне высот 1000-3800 м. Площадь водосбора 1160 км², средняя высота бассейна равна 2400 м, оледенение 81 км². Около 83 % годового стока формируется в вегетационный период. Половодье на р.Каратал обычно начинается в первой декаде апреля. Максимальные расходы воды наблюдаются в мае-июне, во время таяния сезонных запасов снега.

Река Коксу, образуемая от слияния двух примерно равных по водности рек Карасарык и Казан, является основным левым притоком р.Каратал.

Истоки ее находятся среди ледников. Площадь водосбора р.Коксу до с.Коксу составляет 1590 км², средняя высота бассейна 2760 м. Почти вся площадь водосбора р.Коксу до с.Коксу расположена выше 1200 м. Около 70 % площади приходится на высоты более 2500 м. Ледники в бассейне р.Коксу встречаются на высотах более 3000 м, общая площадь оледенения равна 140,3 км². По водному режиму р.Коксу сходна с р.Каратал.

Река Биже - второй по величине приток р.Каратал. Она берет начало на высоте 3000 м с северо-западного склона хребта Алтын-Эмель от слияния родников. Гидрологический пост расположен в 120 м ниже слияния рек Батпак(Досалы) и Кугалинка, в с.Красногоровка. Бассейн р.Биже до этого поста охватывает диапазон высот 1000-3000 м, площадь водосбора 822 км², средняя высота 1490 м. Около 90 % площади водосбора находится ниже 2000 м. Для р.Биже характерно весеннее половодье и повышенный сток в меженный период (июль-февраль). На долю последнего приходится 31-45 % от годового стока.

Река Арысь является крупнейшим притоком р.Сырдарья в пределах Казахстана. Она берет начало в уроч.Чокпак, представляющем седловину между Таласским Алатау и хребтом Каратау. Для р.Арысь характерно общее западное направление течения, которое не изменяется на всем протяжении. Бассейн р.Арысь имеет языкообразную форму, уменьшаясь по ширине к устью. Площадь водосбора у поста ж.-д.ст. Арысь составляет 13000 км². Бассейн расположен в диапазоне высот 200-4200 м. Средняя высота бассейна 900 м. Около 85 % площади расположено на высотах 200-1500 м.

Река Шаян стекает с хребта Каратау и впадает в р.Бугунь. Пост расположен в 3,3 км ниже устья р.Акбет. Площадь водосбора до поста 485 км², средняя высота бассейна 770 м.

Основным источником питания рек Арысь и Шаян являются талые снеговые воды. Вес дождевого, подземного и ледникового питания значительно меньше. Большая часть годовой суммы осадков выпадает в зимне-весенний период. Снежный покров бывает не-

устойчивым. Основной объем стока рек приходится на весну.

Для разработки методик краткосрочного прогноза расходов воды р.Каратал и ее притоков на основе модели формирования стока привлекались данные наблюдений на метеостанции Текели за период 1960-1992 гг., для р.Арысь - метеостанций Тасарык, Ванновка, Шымкент в 1966-1985 гг., для р.Шаян - метеостанции Шаян в 1950 -1990 гг.). При этом с помощью модели, по данным о среднесуточных температурах воздуха и суточных суммах осадков, рассчитывались ординаты гидрографа стока на период заданной заблаговременности с последующей оптимальной (квазиоптимальной) фильтрацией полученных значений стока с целью получения наилучших соотношений S/δ , где S - средняя квадратическая ошибка расчета суточных ординат гидрографа, δ - среднеквадратическое отклонение их значений от средних.

В качестве исходной информации в разработанных методиках при выпуске краткосрочных прогнозов расходов воды используются прогнозируемые значения среднесуточной температуры воздуха и суточных сумм осадков на период заблаговременности 1-3 суток и расход воды в замыкающем створе за предшествующие сутки. Прогнозируемые величины указанных метеозаэментов предварительно анализируются вместе с предшествующими наблюдениями метеорологических станций и в случае необходимости корректируются.

Оценка надежности и эффективности методик производилась по величинам S/δ , R (коэффициент корреляции рассчитанных и фактических значений) и P (обеспеченность прогноза в пределах допустимой погрешности $\delta_{доп}$, %) в предположении 100-процентной оправдываемости прогнозов температуры воздуха и осадков. Естественно, что в случаях, когда прогнозы температур воздуха и осадков не будут оправдываться, показатели качества прогнозов стока ухудшатся.

Результаты оценки разработанных методик приведены в таблице.

**Результаты оценки точности и эффективности
разработанных методик краткосрочных прогнозов
расходов воды за период половодья**

Река-пункт	б _{доп} , м ³ /с	Критерий оценки		
		S/б	R	P, %

Заблаговременность 1 сутки

р. Каратал-с. Каратальское	19,3	0,30	0,95	95,9
р. Коксу-с. Коксу	29,2	0,27	0,96	96,2
р. Биже-с. Красногоровка	1,99	0,45	0,89	91,6
р. Арысь-ж.-д. ст. Арысь	36,1	0,40	0,92	95,0
р. Шаян-в 3,3 км ниже устья р. Акбет	3,96	0,48	0,88	94,0

Заблаговременность 2 суток

р. Каратал-с. Каратальское	19,3	0,36	0,93	93,5
р. Коксу-с. Коксу	29,2	0,36	0,93	93,3
р. Биже-с. Красногоровка	1,96	0,55	0,83	93,1
р. Арысь-ж.-д. ст. Арысь	36,1	0,92	0,82	86,0
р. Шаян-в 3,3 км ниже устья р. Акбет	4,10	0,88	0,70	86,0

Заблаговременность 3 суток

р. Каратал-с. Каратальское	19,2	0,45	0,89	90,4
р. Коксу-с. Коксу	29,4	0,48	0,88	87,8
р. Биже-с. Красногоровка	1,95	0,68	0,73	87,9
р. Арысь-ж.-д. ст. Арысь	36,1	0,73	0,68	74,0
р. Шаян-в 3,3 км ниже устья р. Акбет	3,96	0,69	0,73	85,0

Данные приведенной таблицы показывают, что моделирование ординат гидрографа с помощью используемой модели может быть осуществлено с приемлемой точностью. Разработанные методики имеют показатели качества, удовлетворяющие современным требованиям. Точность моделирования расходов воды

убывает с увеличением заблаговременности используемых исходных данных. Так, коэффициент корреляции между ожидаемыми и измеренными расходами воды за период половодья для р.Арысь изменяется от 0,92 при заблаговременности 1 сутки до 0,68 при заблаговременности 3 суток, обеспеченность P уменьшается от 95 до 74 %. Критерий качества разработанной методики (S/b) ухудшается, возрастая соответственно от 0,40 до 0,73.

Наилучшие результаты получены при прогнозировании водности р.Каратау ($R = 0,89 - 0,95$, $S/b = 0,30 - 0,45$, $P = 90 - 96$ %).

В заключение следует отметить, что методики краткосрочного прогноза стока с использованием модели КазНИГМИ для рек северо-западного склона Джунгарского Алатау и юго-западного склона хребта Каратау разрабатывались впервые. Модель достаточно детально описывает процессы формирования стока в горном бассейне, позволяет вполне удовлетворительно рассчитывать и прогнозировать ординаты гидрографа стока. Это дает основание рекомендовать ее в качестве методической основы для разработки методик краткосрочного прогноза водности горных рек Казахстана. Для составления краткосрочных прогнозов стока при использовании таких методик необходимо располагать прогнозируемыми суточными значениями температуры воздуха и осадков, а также предшествующими расходами воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровикова Л.Н., Денисов Ю.М. Модель поступления воды на поверхность горного бассейна и некоторые результаты ее проверки на бассейнах рек Западного Тянь-Шаня // Тр. САНИГМИ. - 1970. - Вып.52 (67). - С. 3-20.
2. Важнов А.Н. Анализ и прогноз стока рек Кавказа. - М.: Гидрометеиздат, 1966. - 274 с.
3. Виноградов Ю.Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана. - Л.: Гидрометеиздат, Тр. КазНИГМИ. - Вып.28, 1967. - 262 с.

4. Голубцов В.В. О построении математической модели формирования стока в горном бассейне // Тр. КазНИГМИ. - 1975. - Вып.48. - С.3-25.
5. Голубцов В.В., Ли В.И., Строева Т.П. Математическое моделирование процессов формирования стока горных рек в условиях ограниченной информации // Тр. 5-го Всесоюзного гидрологического съезда. - 1989. - Т.6. - С.374-382.
6. Голубцов В.В., Ли В.И., Строева Т.П. Использование модели формирования стока горных рек для разработки метода его долгосрочного прогноза // Тр. 5-го Всесоюзного гидрологического съезда. - 1989. - Т.7. - С.111-117.
7. Голубцов В.В., Попова В.П. Прогноз притока воды в Шульбинское водохранилище // Тр. КазНИГМИ. - 1989. - Вып.104. - С.42-47.
8. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР, условия его формирования и методы прогноза - Л.: Гидрометеиздат, 1969. - 295 с.
9. Ли В.И., Попова В.П. Долгосрочное прогнозирование стока р.Черный Иртыш на основе линейных регрессионных моделей // Тр. КазНИИ Госкомгидромета. - 1987. - Вып.97. - С.8-12.
10. Строева Т.П. К вопросу о прогнозировании водности рек северного склона Джунгарского Алатау (на примере р.Каратал и ее притоков) // Тр. КазНИИ Госкомгидромета. - 1991.- Вып.107. - С.148-156.

Казахский научно-исследовательский институт мониторинга окружающей среды и климата

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ТАУ ӨЗЕНДЕРІ СУЛЫЛЫҒЫН ҚЫСҚА
МЕРІЗІМДІ БОЛЖАУ ҮШІН АҒЫСТАРДЫ
ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ МОДЕЛДЕРІН
ПАЙДАЛАНУ

Геогр. ф. канд
Техн. ф. канд

В.В.Голубцов
В.И.Ли
В.П.Попова
Т.П. Строева

Жоңғар Алатауының солтүстік-батыс жоталары мен Каратаудың оңтүстік-батыс сілемдері жоталарындағы бірқатар өзендер мысалында Қазақстандағы тау өзендері сулылығын қысқа мерзімді болжау үшін ағыстарды қалыптастырудың моделдерін пайдаланудағы әдістердің мүмкіндігі қарастырылады. Дайындалған әдістің нәтижелі бағасы ашып көрсетілген.