

УДК 556.3.013; 556.3.072

А.А. Болатова^{1,2}
Т.А. Тілләкәрім^{1,2}
М.Н. Раимжанова¹

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ HBV ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТОКА РЕК НА ПРИМЕРЕ БОКОВОГО ПРИТОКА ВОДЫ В ШУЛЬБИНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Ключевые слова: гидрологическое моделирование, концептуальная модель HBV, калибрование, весеннее половодье, краткосрочный прогноз стока, Шульбинское водохранилище

В данной статье рассматривается возможность применения концептуальной гидрологической модели HBV при составлении краткосрочного прогноза стока рек, на примере бокового притока воды в Шульбинское водохранилище. В связи с изменениями погодноклиматических условий, а также антропогенного влияния на окружающую среду, методики расчета и прогноза притока воды, разработанные в прошлом столетии в научно-методическом отношении, устарели. Составление краткосрочного прогноза притока воды в Шульбинское водохранилище с помощью численных методов прогнозирования является важным фактором повышения эффективности управления водохозяйственными системами. Приведены краткое описание модели, входные гидрометеорологические данные и данные цифровой модели рельефа, а также данные ледниковых составляющих и их обработка с помощью информационной платформы ArcGIS. Калибрация модели была произведена за период 1978...2018 г.г., выбраны периоды с наилучшими результатами калибрования стока рек Оба и Ульби. В качестве оценки эффективности модели используется критерий Нэша-Сатклиффа. В результате подбора наилучших параметров эффективность моделей для рек составила 0,908...0,922 соответственно. Результаты краткосрочного прогноза стока с использованием численного моделирования с заблаговременностью

¹ КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан.

² Казгидромет, г. Алматы, Казахстан.

на 1, 3 и 7 суток характеризуются хорошими показателями оправдываемости прогнозов. При прогнозировании стока на 1 сутки оправдываемость прогнозов составила 81 %, 3 суток – 80 , 7 суток – 77 %.

Введение. Прогнозирование речного стока является одной из мер, используемых в управлении водными ресурсами для решения проблем неопределенности климата, а также в управлении водопользованием, в том числе гидроэнергетика, водоснабжение, орошение, судоходство, борьба с наводнениями и охрана окружающей среды, зависящих от количества воды в речных системах [26]. Прогнозирование паводков, вследствие таяния снежного покрова и льда в реках весной; по причине сильных осадков и волновых явлений в районах вдоль побережья и устьев рек [17], является сложной областью оперативной гидрологии. Прогнозы речного стока могут быть произведены в краткосрочном периоде – в течение нескольких часов или нескольких дней и в долгосрочном периоде – до девяти месяцев [10]. Обычно краткосрочные прогнозы стока используются для управления рисками наводнений и при эффективной системе заблаговременного оповещения могут значительно повысить общественную безопасность, уменьшить социальный ущерб и сократить экономические потери [17, 22].

Для исследования гидрологических процессов используются стандартные инструменты – модели дождевого стока, которые используются для моделирования как изученных, так и неизученных водосборов, помогают в прогнозировании паводков, надлежащем управлении водными ресурсами и оценке качества воды, эрозии и седиментации, циркуляции питательных веществ и пестицидов, землепользовании и изменении климата и т. д. [9]. Гидрологические модели являясь важным и необходимым инструментом для управления водными и природными ресурсами на сегодняшний день исчисляются многими десятками – от простейших точечных до распределенных, с сотнями пространственных элементов и десятками параметров в каждом [3]. В работе [15] приведены технические обзоры крупномасштабных гидрологических моделей для внедрения в оперативные схемы прогнозирования паводков на континентальном уровне. Используемая концептуальная модель HBV описана [27, 11, 21] и широко применяется при моделировании гидрологических процессов [23, 14, 19, 24].

В Казахстане наводнения представляют значительную угрозу для части населения, проживающего на берегах крупных рек, таких как Иртыш,

Урал, Тобол, Ишим и др. Во время весеннего таяния снега объем стока в этих реках увеличивается, иногда более чем в 1000 раз, часто выходя из берегов и затапливая большие территории [20]. Данные о притоке воды к водохранилищам необходимы для эффективного управления ущербом от наводнений [16], таким образом целью данного исследования является составление краткосрочных прогнозов стока с использованием гидрологической модели HBV на примере рек Оба и Ульби, составляющих боковой приток Шульбинского водохранилища.

Область исследования. Шульбинское водохранилище является одним из крупных водохранилищ Иртышского каскада, емкость которых составляет 52,7 км³ комплексного назначения. Общий объем составляет 2390 млн. м³, площадь 255 га. Шульбинское водохранилище введено в эксплуатацию в 1988 г. Главными притоками водохранилища являются реки Оба и Ульби (рис. 1). Гидроузел осуществляет неполное сезонное регулирование стока боковой проточности ниже плотины Бухтарминской ГЭС при природоохранных весенних пусках и при прохождении летне-осенних паводков. Режим водохранилища – полностью искусственный, исключая период пусков рек Оба и Ульби в период паводков. В апреле – мае водохранилище сбрасывается более чем на половину, чем обеспечивает орошение поймы Иртыша. При сбросе максимального расхода очень редкой повторяемости (0,01 %) при горизонте форсировки возможный расход составляет 8770 м³/с. В состав сооружений Шульбинского гидроузла входят здание ГЭС с шестью агрегатами общей мощностью 702 МВт, земляная русловая плотина высотой 36 м и судоходный шлюз [4].

Водный режим р. Иртыш в районе Шульбинского водохранилища в основном определяется особенностями стока в верхней части реки, сильно зарегулированного Бухтарминским и Усть-Каменогорским водохранилищами, и стока правобережных притоков Ульби, Оба, Шульбинка и др., питающихся за счет таяния горных снегов и выпадающих дождей. Бассейны рек Оба и Ульби составляют 75 % площади правобережной части бассейна р. Иртыш на участке между Усть-Каменогорским и Шульбинским водохранилищами. Важной фазой гидрологического режима рек Оба и Ульби, необходимой для оценки их водности в весенний период, является вскрытие. Начало ледохода на этих реках наблюдается в среднем во второй декаде апреля. Даты поздних сроков вскрытия совпадают со средней датой начала расчетных пусков воды из Бухтарминского водохранилища. Весеннее половодье начинается обычно через 5...8 сут. после наступления устойчивого

перехода среднесуточных температур воздуха через 0°C к положительным значениям. Переход температуры воздуха через 0°C происходит, как правило, во второй декаде марта. Максимальные уровни и расходы воды в период весеннего половодья обычно наблюдаются в конце апреля – начале мая и продолжаются 1...2 сут. Конец половодья на реках Оба и Ульби происходит в весенне-летние (апрель-сентябрь) месяцы. Зимний сток имеет почти постоянную величину и составляет 5...9 % годового стока. Сток весеннего половодья рек Оба и Ульби используется для осуществления специализированных попусков с целью затопления поймы р. Иртыш ниже с. Шульба. Дата начала попусков соответствует дате наибольшего расхода за половодье, обеспеченного в течение 18 сут. [8].

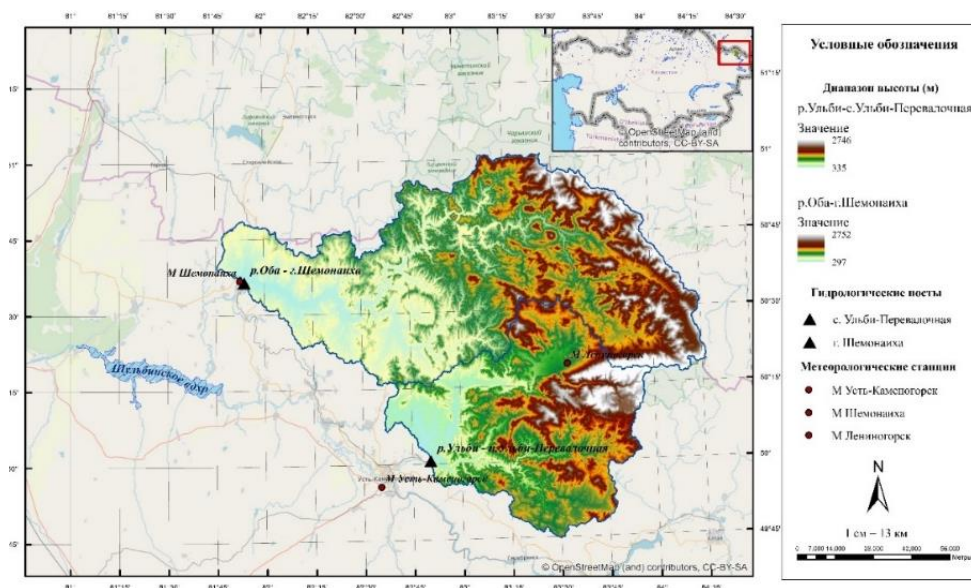


Рис. 1. Высотная карта р. Оба – г. Шемонаиха и р. Ульби – с. Ульби-Перевалочная.

Материалы и методы исследования. Математическое моделирование процессов формирования речного стока образует базовый исследовательский и инженерный инструментарий современной гидрологии. На сегодняшний день существует большое количество моделей для речных водосборов с различной степенью сложности, от простых в основе которых лежат простые эмпирические формулы до сложных математических моделей, представляющих все этапы водного баланса речного бассейна [25]. В настоящее время для моделирования стока рек разработано

и используется множество методов, в особенности модели, основанные на гидролого-геологических процессах.

В данной работе для прогнозирования стока использовалась гидрологическая концептуальная модель HBV [11]. Важнейшими задачами моделирования являются повышение эффективности их функционирования, в связи с этим для оценки эффективности модели, т.е. взаимосвязь смоделированного и фактического значений используется критерий Нэша-Сатклиффа [18], который варьируется от $-\infty$ до $+1.0$, где 1.0 является наилучшим показателем:

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}, \quad (1)$$

где Q_{obs} – наблюдаемый расход воды, $м^3/с$; Q_{sim} – смоделированный расход воды, $м^3/с$.

Моделирование гидрографа стока производилось по фактическим данным о среднесуточных температурах и суточных сумм осадков до даты выпуска прогноза и по прогнозируемым величинами этих метеорологических элементов на период заблаговременности прогноза. Расходы воды на каждые сутки прогнозируемого периода, по рассчитанному таким образом гидрографу, принимались в качестве ожидаемых. Такая процедура составления прогнозов повторялась ежедневно, что позволяло уточнять выпущенные прогнозы в предыдущие сутки. Заблаговременность прогнозов в принципе может быть любой.

Модель HBV. Модель HBV [21] классифицируется как полураспределенная концептуальная модель. Модель разработана в Шведском метеорологическом и гидрологическом институте (SMHI) [11]. В качестве первичных гидрологических единиц используется суббассейны и их распределение по высотным зонам. Модель состоит из трех основных компонентов [21]:

- подпрограмма для накопления и таяния снега;
- подпрограмма для учета влажности почвы;
- ответные и речные подпрограммы.

Модель включает ряд процедур (рис. 2): накопление и таяние снега, расчет почвенной влаги, учет подземных вод, расчет гидрографа стока [13].



Рис. 2. Структура модели HBV [12].

Модель HBV моделирует среднесуточный сток используя в качестве входных данных средневзвешанные осадки, температуру воздуха и потенциальное испарение. Основными выходными данными модели являются расходы воды на каждом водосборном участке. Формула (2) общего водного баланса может быть описана как [14]:

$$P-E-Q=d [SP+SM+UZ+LZ+lakes]/dt, \quad (2)$$

где P – осадки, E – испарение, Q – сток, SP – снежный покров, SM – влажность почвы, UZ – верхняя зона грунтовых вод, LZ – нижняя зона грунтовых вод, lakes – объем озера.

Результаты исследования. Объектом исследования данной работы является Шульбинское водохранилище, боковой приток которого составляют реки Оба и Ульби. Калибровка модели HBV для рек Оба – г. Шемонаиха и Ульби – с. Ульби-Перевалочная производилась за период 1978...2018 гг. Из множества вариантов калибровки были выбраны годы с наилучшими результатами. Подробное описание калибровки модели и подобранные параметры приведены в работе [1].

Входные данные. В качестве входных данных модель использует данные цифровой модели рельефа (ЦМР), классифицируемые по высоте с помощью Геоинформационной системы (ГИС). Для подготовки ЦМР использовались трехмерные снимки SRTM (Shuttle radar topography mission) с разрешением 30 x 30 м, полученные из официального сайта Геологической службы США [6]. Бассейны были построены в проекционной системе координат WGS_1984_UTM_Zone_44N. Последующая обработка

трехмерного снимка производилось в модуле ESRI ArcGIS Desktop. На основе данных SRTM подготовлены высотные карты бассейнов рек Оба и Ульби (рис. 1). Проведен анализ рельефа каждого бассейна (направление потока, локальное понижение, заполнение, общий суммарный сток, идентификация, порядок водотоков, привязка точек устьев), классификация площади бассейнов по высотным зонам и выделены склоны различных экспозиций. А также использовались данные ледников, полигоны которых получены из официального сайта GLIMS: глобального измерения сухопутного льда из космоса [7].

При процессе калибрования параметров в модель необходимо внести исходные данные: среднесуточная температура воздуха, сумма осадков, испарение и среднесуточный расход воды [11]. Для расчета испаряемости в данной работе использовалось уравнение Н.Н. Иванова [3]:

$$E_0 = 0.0018(T + 25)^2(100 - r) \quad (3)$$

где T – среднемесячная температура, r – среднемесячная относительная влажность воздуха.

В качестве входных данных в модель закладываются среднесуточные расходы воды [5] и значения средней температуры воздуха, суммы осадков с дневным шагом. Для прогнозирования стока на исследуемых реках были использованы синоптические данные ГМЦ РГП «Казгидромет» с заблаговременностью 7 сут.

Важным фактором при калибровании параметров гидрологической модели является правильный выбор метеорологических станций, данные которых наиболее точно отражают режим стока реки. Для возможности калибрования параметров модели необходимо иметь однородный ряд с гидрометеорологическими данными без пропусков, с исключением ошибок, чтобы получить набор параметров, описывающих гидрологический режим исследуемой реки.

Результаты и обсуждение. *Река Оба.* В программном средстве ArcGIS определены: площадь водосборной области р. Оба – г. Шемонаиха 8552 км², высотный диапазон водосборной области варьируется в пределах от 297 до 2752 м. Для исследуемой территории использовались метеорологические данные М Лениногорск и Шемонаиха, средняя высота которых составляет 559 м н.у.м. (табл. 1). На рис. 3 представлены графики результата калибрования среднесуточных (рис. 3а) и среднемесячных (рис. 3б) расходов воды для р. Оба – г. Шемонаиха.

Таблица 1

Характеристики водосбора и результаты калибрования рек Оба и Ульби

Характеристики	Река-пункт	
	р.Оба- г.Шемонаиха	р.Ульби-с.Ульби- Перевалочная
Площадь водосбора, км ²	8552	4931
Диапазон высот водосбора, м	297...2752	335...2746
Метеостанции (М)	Лениногорск, Шемонаиха	Лениногорск, Усть- Каменогорск
Средняя высота М, м н.у.м.*	559	547
Период калибровки, г.г.	2002...2005	1986...1990
Эффективность модели (NSE)	0,908	0,922
Коэффициент корреляции	0,947	0,963

Примечание: * - для запуска модели применяется средняя высота используемых метеорологических станции.

Согласно графику связи моделированного и фактического стока (рис. 4), можно сделать вывод, что корреляционная связь тесная, так как $R^2=0,918$.

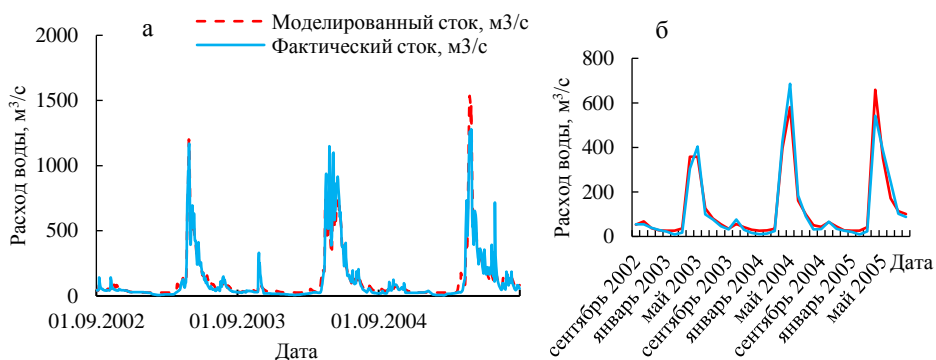


Рис. 3. Результаты калибрования среднесуточных (а) и среднемесячных расходов воды (б) р. Оба – г. Шемонаиха.

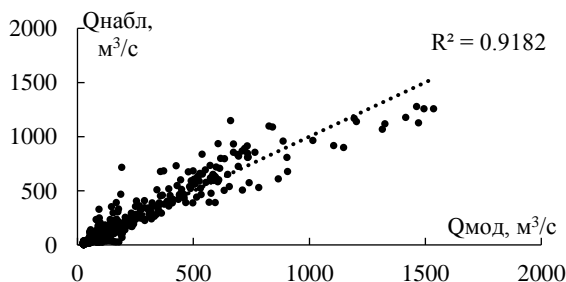


Рис. 4. Связь моделированного и фактического стока р. Оба – г. Шемонаиха.

Наилучшая согласованность наблюдаемого стока с моделированным для р. Оба – г. Шемонаиха наблюдается в период 2002 по 2005 гг. и эффективность модели, рассчитанная критерием Нэша-Сатклиффа [18], составляет 0,908. Коэффициент корреляционной связи смоделированного и наблюдаемого стока составил $r=0,947$ (табл. 1).

Река Ульби. Площадь водосборной области р. Ульби–с. Ульби-Перевалочная 4931 км², высотный диапазон водосборной области варьируется в пределах от 335 до 2746 м. Для исследуемой территории использовались метеорологические данные М Лениногорск и Усть-Каменогорск, средняя высота которых составляет 547 м н.у.м. (табл. 1).

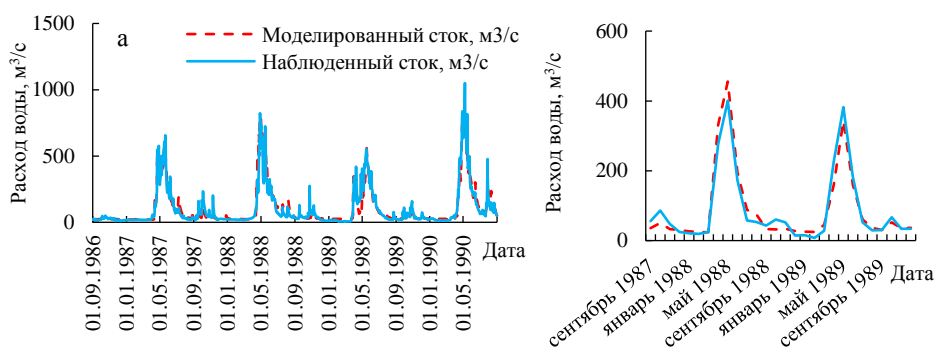


Рис. 5. Результаты калибрования (а) и среднеемесячные расходы моделированного и фактического расхода воды (б) р. Ульби – с.Ульби-Перевалочная.

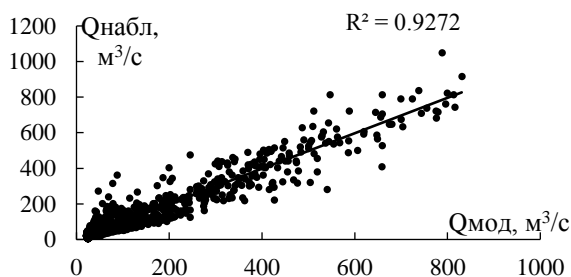


Рис. 6. Связь моделированного и фактического стока р. Ульби – с.Ульби-Перевалочная.

Для р. Ульби –с. Ульби-Перевалочная наилучшая согласованность наблюдаемого стока с моделированным наблюдается в период 1986 по 1990 гг., а эффективность модели составляет 0,922. Коэффициент корреляционной связи смоделированного и наблюдаемого стока составил $r=0,963$ (табл.

1). На рис. 5 представлены графики результата калибрования среднесуточных (рис. 5а) и среднемесячных (рис. 5б) расходов воды для р. Ульби-г. Ульби-Перевалочная. Согласно графику связи моделированного и фактического стока (рис. 6) наблюдается тесная корреляционная связь.

Результаты работ по прогнозированию стока бокового притока в Шульбинское водохранилище с заблаговременностью 1 сут., проведенные в период 28 марта по 26 апреля 2018 г. показывают, что оправдываемость прогнозов варьируются в пределах от 63 до 100 %, составляя в среднем 81 % (табл. 2, рис. 7).

Таблица 2

Результаты расчетного и фактического стока в период 28 марта по 26 апреля с заблаговременностью 1 сутки

Прогнозируемая дата	Расчетанный сток, м ³ /с	Фактический сток, м ³ /с	Разница между фактическим и расчетанным	P, %
28 марта	357	398	41	90
29 марта	316	406	90	78
30 марта	575	496	-79	86
31 марта	507	716	209	71
3 апреля	749	591	-158	79
4 апреля	586	377	-209	64
5 апреля	369	299	-70	81
6 апреля	396	298	-98	75
7 апреля	479	401	-78	84
10 апреля	658	703	45	94
11 апреля	628	744	116	84
12 апреля	797	529	-268	66
13 апреля	730	441	-289	60
14 апреля	513	502	-11	98
17 апреля	892	977	85	91
18 апреля	899	960	61	94
19 апреля	929	801	-128	86
20 апреля	564	682	118	83
21 апреля	479	611	132	78
22 апреля	573	522	-51	91
23 апреля	982	618	-364	63
24 апреля	1382	951	-431	69
25 апреля	1159	1510	351	77
26 апреля	1443	1446	3	100

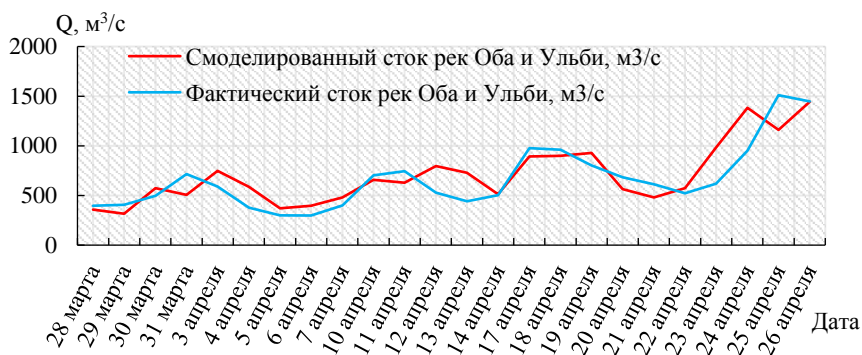


Рис. 7. Результаты прогнозирования притока в Шульбинское водохранилище (суммарный сток р.Ульби – с.Ульби-Перевалочная и р.Оба – г.Шемонаиха) с заблаговременностью 1 сутки.

Моделирование гидрографа стока с заблаговременностью 3 и 7 сут. производились следующим способом. Например, если прогноз составлялся 8-го марта на период до 10-го марта, то для расчета гидрографа объема до 7-го марта включительно использовались фактические температуры воздуха и осадки, а за период с 8 по 10 марта – прогнозируемые. Полученные результаты принимались в качестве ожидаемых.

На рис. 8(а) и рис. 8(б) и табл. 3-4 показаны результаты прогнозирования объема бокового притока в Шульбинское водохранилище с наблюдаемыми данными с заблаговременностью 3 и 7 сут. соответственно в период с марта по сентябрь 2018 г. По результатам работы модели оправдываемость объема воды на 3 сут. составила 80 %, а коэффициент корреляции между смоделированным и фактическим объемом воды составил 0,935.

Таблица 3

Результаты рассчитанного и фактического объема воды с заблаговременностью 3 суток.

Прогнозируемые даты (3 суток)	Рассчитанный объем, млн.м ³	Фактический объем, млн.м ³	Факт - Рассчитанный, млн.м ³	P, %
8-10 марта	12,1	8,3	-3,8	69
15...17 марта	12,9	13,3	0,5	104
22...24 марта	121,1	32,8	-88,3	27
29...31 марта	99,2	139,3	40,1	71
5...7 апреля	105,7	86,2	-19,5	82
12...14 апреля	185,5	127,2	-58,3	69

Прогнозируемые даты (3 суток)	Рассчитанный объем, млн.м ³	Фактический объем, млн.м ³	Факт - Рассчитанный, млн.м ³	P, %
18...20 апреля	127,1	211,1	84,0	60
25...27 апреля	356,1	356,1	-0,1	100
2...4 мая	295,6	335,1	39,5	88
9...11 мая	116,9	140,2	23,3	83
16...18 мая	115,5	134,8	19,3	86
24...25 мая	143,0	146,7	3,7	97
30 мая...1 июня	158,8	192,6	33,8	82
6...8 июня	115,3	188,6	73,3	61
13...15 июня	145,1	157,5	12,4	92
20...22 июня	70,6	115,9	45,3	61
27...29 июня	59,9	73,2	13,2	82
4...6 июля	46,6	54,4	7,8	86
11...13 июля	30,7	26,4	-4,3	86
18...20 июля	20,8	23,6	2,9	88
25-27 июля	20,5	25,6	5,1	80
1...3 августа	17,8	16,4	-1,4	92
8...10 августа	14,9	15,1	0,2	98
15...17 августа	21,3	21,2	-0,1	99
22...24 августа	20,3	15,2	-5,1	75
29...31 августа	20,6	15,3	-5,3	74

Таблица 4

Результаты расчетного и фактического объема воды с заблаговременностью 7 суток.

Прогнозируемые даты (7 суток)	Рассчитанный объем, млн.м ³	Фактический объем, млн.м ³	Факт – Рассчит., млн.м ³	P, %
2...9 марта	28,3	18,7	-9,6	66
9...16 марта	51,4	25,5	-25,9	50
16...23 марта	56,3	42,1	-14,2	75
23...30 марта	299,8	185,5	-114,3	62
30 марта... 6 апреля	183,5	340,5	157,0	54
6...13 апреля	380,0	337,0	-43,0	89
13...20 апреля	609,9	495,2	-114,7	81
20...27 апреля	541,0	447,9	-93,1	83
27 апреля...4 мая	591,5	624,5	33,0	95
4...11 мая	363,7	411,7	48,0	88
11...18 мая	289,5	287,3	-2,2	99

Прогнозируемые даты (7 суток)	Рассчитанный объем, млн.м ³	Фактический объем, млн.м ³	Факт – Рассчит., млн.м ³	P, %
18...25 мая	203,5	247,9	44,4	82
25 мая...1 июня	307,5	364,4	57,0	84
1...8 июня	316,7	462,7	146,0	68
8...15 июня	267,5	398,1	130,7	67
15...22 июня	96,9	175,7	78,8	55
22...29 июня	172,5	186,4	13,9	93
30 июня...6 июля	183,7	127,5	-56,2	69
6...13 июля	116,4	69,9	-46,5	60
14...20 июля	67,3	55,6	-11,7	83
21...27 июля	90,5	52,3	-38,2	58
27 июля...3 августа	47,7	42,6	-5,1	89
3...11 августа	45,5	39,5	-6,0	87
10...17 августа	53,1	46,6	-6,5	88
17...24 августа	44,3	37,0	-7,2	84
24...31 августа	42,7	36,8	-5,9	86

Согласно рис. 7(б) и табл. 4 результаты прогнозирования оправдываемости объёма воды с заблаговременностью 7 сут., показывают, что смоделированный объём воды хорошо воспроизводит фактический, составляя 77 %, а коэффициент корреляции между смоделированными и фактическими данными равен 0,925.

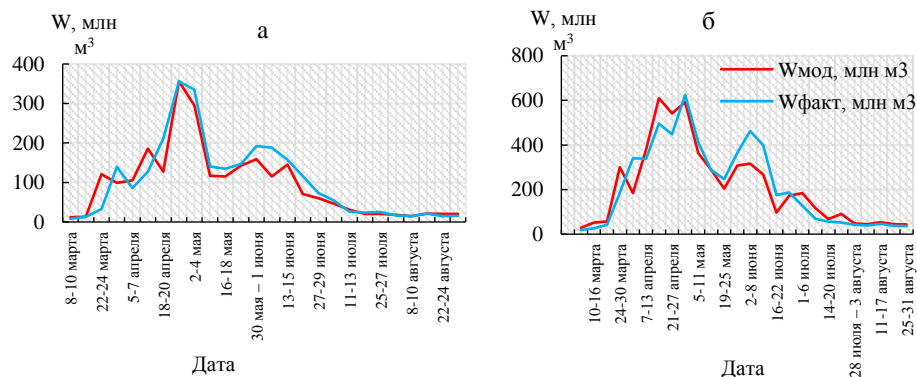


Рис. 8. Результаты прогнозирования притока в Шульбинское водохранилище (р.Ульби – с.Ульби-Перевалочная и р.Оба – г.Шемонаиха) с заблаговременностью на 3 суток (а) и на 7 суток(б).

Данное исследование показывает, что использование концептуальной модели HBV при составлении краткосрочного прогноза стока рек Оба и Ульби дает хорошие результаты. Данные модели

применимы при усовершенствовании методики составления краткосрочных прогнозов притока воды в Шульбинское водохранилище. Вследствие редкой сети метеорологических станций в исследуемой горной территории при калибровке модели возникли проблемы при подборе подходящих метеорологической станций, высоты которых не превышают 1000 м н.у.м. и отсутствием станций в зоне формирования стока, этим объясняются случаи низкой оправдываемости прогнозов.

Заключение. Авторами проведена работа по адаптации модели НВУ для рек Оба и Ульби. Эффективность модели составила 0,908...0,922. Модель хорошо воспроизводит динамику моделируемой величины и модельный ряд можно считать адекватным. Полученные параметры при калибровке модели рекомендуется использовать для прогнозирования, а также для восстановления стока р. Оба – г. Шемонаиха и р. Ульби – с. Ульби-Перевалочная.

Таким образом, проведено тестирование работы модели НВУ для прогнозирования объема воды, поступающего в Шульбинское водохранилище с заблаговременностью 1 сут. в период март – апрель и в период март – сентябрь 2018 г. с заблаговременностью 3 и 7 сут. При оценке оправдываемости прогнозирования стока средняя оправдываемость при заблаговременности 1 сут. составляет 81%, при заблаговременности 3 сут. – 80 %, при заблаговременности 7 сут. – 77 %. При практическом использовании модели рекомендуется ограничиваться составлением прогнозов стока с заблаговременностью 1...3 сут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болатова А.А., Тіллэкәрім Т.А., М.Н. Раимжанова, Серікбай Н.Т., Багитова Б.Е., Болатов К.М. Результаты калибровки гидрологической модели НВУ для горных рек Казахстана // Гидрометеорология и экология. – 2018. – № 3. – С. 110-124.
2. Браславский А.П. Нормы испарения с поверхности водохранилищ / А.П. Браславский, З.А. Викулина. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 212 с.
3. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 311 с.
4. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление, Т. VII, Кн. 1: Возобновляемые ресурсы поверхностных вод западного, северного, центрального и восточного Казахстана/ под науч. ред. Р.И. Гальперина. – Алматы: ТОО «Арко», 2012. – 684 с.

5. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, Бассейны рек Иртыш, Ишим и Тобол (верхнее течение), Вып. 1, Ч. 1, ГВК РК РГП «Казгидромет», 1978-2018.
6. Официальный сайт Геологической службы США. [Электрон. ресурс] URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 09.11.2017).
7. Официальный сайт GLIMS: глобального измерения сухопутного льда из космоса [Электрон. ресурс] URL: <https://www.glims.org/> (дата обращения: 10.11.2018).
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. – Вып. 1. Горный Алтай и Верхний Иртыш. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 318 с.
9. Gayathri K Devi, Ganasri B.P., Dwarakish G.S. A Review on Hydrological Models / International conference on water resources, Coastal and ocean engineering (ICWRCOE 2015), Aquatic Procedia. – № 4. – 2015.– P. 1001-1007.
10. Georgakakos P.K.; Hudlow, M.D., Quantitative Precipitation Forecast Techniques for use in Hydrological Forecasting // Bull. Am. Meteorol. Soc. – 1984. – № 65. – P.1186-1200.
11. Jan Seibert. HBV light version 2, User's Manual. Stockholm University, Department of Physical Geography and Quaternary Geology. – 2005. – 32 p.
12. Jan Seibert, M.J. Vis Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package // Hydrol. Earth System Sciences. – 2012. – № 16. – P. 3315–3325.
13. Jan Seibert. Multi-criteria calibration of conceptual runoff model using a genetic algorithm // Hydrology and Earth Sciences. – 2000. – № 4(2). – P. 215-224.
14. Jia Q.Y., Sun F.H. Modeling and forecasting process using the HBV model in Liao river delta / The 18th Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling, Environmental Sciences. – 2012. – № 8. – P. 122–128.
15. Kauffeldt A., Wetterhall F., Pappenberger F., Salamon P., Thielen J. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level // Environmental Modelling & Software. – 2016. – № 75. – P. 68-76.
16. Kim N. W.; Jung Y.; Lee J. E. Spatial propagation of streamflow data in ungauged watersheds using a lumped conceptual model // Journal of Water and Climate Change. – 2018. – № 10 (1). – P. 89-101.
17. Merkuryeva G., Merkuryev Y., Boris V. Sokolov, Potryasaev S., Zelentsov Viacheslav A., Lektauers A. Advanced river flood monitoring, modelling

- and forecasting // *Journal of Computational Sciences*. – 2015. – № 10. – P.77-85p.
18. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models, part 1-a discussion of principles // *Journal of Hydrology*. – Amsterdam, 1970. – № 10. – P. 282-290.
 19. Reynolds J.E., Halldin S., Xu C.Y., Seibert J., Kauffeldt A. Sub-daily runoff predictions using parameters calibrated on the basis of data with a daily temporal resolution // *Journal of Hydrology*. – 2017. – № 550. – P. 399-411.
 20. Spivak L., Arkhipkin O., Pankratov V., Vitkovskaya I., Sagatdinova G. Space monitoring of floods in Kazakhstan // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2004. – Vol. 67, Issues 4–5, 3. – P. 365-370.
 21. Sten Bergström, 1992. The HBV model – its structure and applications SMHI RH, №4, April 1992. 35 p.
 22. Tucci C., Collischonn W. Flood forecasting // *WMO Bull.* – 2006. – № 55 (3). – P.179–184.
 23. Valent P., Szolgay J., Riverso C. Assessment of the uncertainties of a conceptual hydrologic model by using artificially generated flows // *Slovak journal of civil engineering*. – 2012. – Vol. XX. – № 4. – P. 35-43.
 24. Vormoor K., Heistermann M., Bronstert A., Lawrence D. Hydrological model parameter (in) stability – “crash testing” the HBV model under contrasting flood seasonality conditions // *Hydrological Sciences journal*. – 2018. – Vol. 63. – № 7. – P. 991–1007.
 25. WMO, 1986. Intercomparison of models of snowmelt runoff. Operational Hydrology. Report № 23. – 1986, WMO-№ 646. – 482 p.
 26. WMO, 2002. Carlos E.M. Tucci Flood flow forecasting, Institute of Hydraulic Research, Federal University of Rio Grande do Sul, 35 p.
 27. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices, WMO № 168, Sixth edition, 2009. – 302 p.

Поступила 15.09.2019

А. А. Болатова
Т. А. Тілләкәрім
М. Н. Раимжанова

НВУ ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ МОДЕЛІН ШҮЛБІ СУ ҚОЙМАСЫНЫҢ БҮЙІР САЛАСЫ МЫСАЛЫНДА ӨЗЕН АҒЫНДЫСЫН БОЛЖАУҒА ҚОЛДАНУ

Түйін сөздер: гидрологиялық модельдеу, НВУ концептуалды моделі, калибрлеу, көктемгі су тасу, ағындыны қысқа мерзімді болжау, Шүлбі су қоймасы

Берілген мақалада өткен ғасырда құрастырылған Шүлбі су қоймасына келіп түсетін ағындының бүйір саласын болжау әдісі климаттың өзгеруімен байланысты ғылыми-әдістемелік тұрғыдан ескіргендіктен, НВУ концептуалды моделінің көмегімен болжау негіздері көрсетілген. Сонымен қатар, модельдің қысқаша сипаттамасы, қолданылатын гидрометеорологиялық мәліметтер мен беткейдің сандық моделінің ақпараттары, сонымен қатар мұздық құрауыштарының мәліметтері мен оларды ArcGIS ақпараттық платформасында өңдеу берілген. Модельдің тиімділігін есептеу үшін Нэш-Сатклиффтің критерийі қолданылған. Шүлбі су қоймасының бүйір салалары болып табылатын Оба және Үлбі өзендерінің ағындыларына 1978...2018 жж. кезеңіне модельдің калибрациясы жүргізіліп, көрсеткіші жоғары нәтижелі кезең таңдалды. Оңтайлы параметрлерді таңдау нәтижесінде модельдің тиімділігі, жоғарыда аталған өзендер үшін, сәйкесінше 0,908...0,922 құрады. Калибрация нәтижесінің параметрлерін қысқа мерзімді, 1, 3, 7 тәулікке, ағынды болжамына қолдану барысында сандық модельдеу жақсы нәтиже көрсетті. Ағындыны 1 тәулікке болжаудың ақталушылығы 81 %, 3 тәулікке – 80 %, 7 тәулікке – 77 % құрады. Оба және Үлбі өзендері ағындыларына болжамның сандық әдістерін қолданып, қысқа мерзімді болжам жасау су шаруашылық жүйелерін басқарудың тиімділігін арттыратын маңызды фактор болып табылады.

A.A. Bolatova, T.A. Tillakarim, M.N. Raymzhanova

USING HYDROLOGICAL MODEL HBV FOR FORECASTING RIVER DISCHARGE ON THE EXAMPLE OF THE LATERAL WATER FLOW TO THE SHULBI RESERVOIR

Key words: hydrological modelling, conceptual model HBV, calibration, spring flood, short-term runoff forecast, Shulbi reservoir

The article shows short-term runoff forecasting with using hydrological model HBV on the example of the lateral water flow to the Shulbi reservoir that methods of measurements and forecasting water inflow, which developed in last century are outdated in scientifically and methodically due to changes in input parameters taking into account climate change. The article provides a brief description of the model, hydrometeorological input data and digital elevation model data, also given information about glacial components and their processing on the ArcGIS information platform. For calculating of model's efficiency, used the Nash-Sutcliffe Efficiency. The model was calibrated for the period 1978...2018 and were selected the periods with the best results of calibrating for runoff of the Oba and Ulbi rivers, which make up the total lateral tributary to the Shulbi reservoir. The calibration results of the selection of the best parameters the efficiency of the models amounted 0.908...0.922, respectively. The results of a short-term runoff forecast, with using calibration parameters, for a lead time of 1 day, 3 and 7 days, showed good indicators of forecasting quality. The forecast predictability for 1 day was 81 %, 3 day – 80 %, 7 day – 77 %. Preparation of a short-term forecast of runoff of the Oba and Ulbi rivers using numerical forecasting methods is an important factor in improving the management