

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-129-143>

УДК 504.453

Усовершенствование методики прогноза характеристик весеннего стока рек Жайык-Каспийского бассейна в условиях доступной гидрометеорологической информации

***С.Б. Саиров, Т.А. Тиллакарим,
Н.Т. Серикбай, Б.Б. Айтымова***

*Республиканское Государственное Предприятие «Казгидромет»,
Республика Казахстан, г. Астана
sairov_s@meteo.kz*

Представлены результаты исследования и апробации усовершенствованной методики прогноза максимальных уровней воды в весенний период года с использованием регрессионного анализа. Объектом исследования выбраны реки Жайык-Каспийского (Урало-Каспийского) бассейна, относящиеся к казахстанскому типу с весенним половодьем. К факторам формирования весеннего стока (температурный режим, количество осадков зимнего периода, гидрологический режим рек на момент прогноза) в качестве дополнительных предложены предикторы: продолжительность и расходы воды на конец половодья предшествующего года, а также минимальный зимний сток. Учет этих факторов позволил повысить точность долгосрочного прогноза максимального уровня воды весеннего половодья.

Ключевые слова: гидрологический прогноз, максимальный уровень, мониторинг, половодье, снеговое питание, реки казахстанского типа

Improvement of the methodology for forecasting spring runoff characteristics of rivers in the Zhaiyk-Caspian basin under the conditions of available hydrometeorological information

***S.B. Sairov, T.A. Tillakarim,
N.T. Serikbay, B.B. Aitymova***

*Republican State Enterprise "Kazhydromet", Astana, Republic of Kazakhstan
sairov_s@meteo.kz*

The results of research and approbation of improved methodology of pro-forecasting of maximum water levels in the spring period of the year using regression analysis are presented. The rivers of the Zhaiyk-Caspian basin belonging to the Kazakhstan type with spring flood are chosen as the object of research. The article considers the improvement of the existing methodology for predicting maximum water levels by using additional factors of spring runoff formation. Thus, in addition to the factors of spring runoff formation (temperature regime of spring, winter precipitation, hydrological regime of rivers at the time of forecast release), as additional predictors it is proposed to take into account characteristic parameters of hydrological regime, such as: duration and water discharge at the end of the flood of the previous year, as well as the minimum winter runoff. Taking into account these

factors allowed to increase the accuracy of forecasts of the maximum water level of spring floods – the quality criterion of the methodology increased from 0,02 to 0,25.

Keywords: hydrological forecast, maximum level, monitoring, floor-soil, snow supply, Kazakhstan

Введение

Весеннее половодье на реках Казахстана обусловлено накоплением снега в зимний период и его последующим таянием. Оно проявляется ежегодно в один и тот же сезон, но с различной интенсивностью и продолжительностью, зависящими от объема накопленного снега в пределах одной климатической зоны. Это явление представляет собой основную фазу водного режима рек, в ходе которой проходит основная часть (более 70 %) годового стока. В период высокой водности весной реки могут выходить из русел, затапливая поймы и причиняя ущерб прибрежным населенным территориям. Низкое половодье приводит к отсутствию пополнения талыми водами пойменных озер, что со временем может вызвать их обмеление и исчезновение, а также снижение уровня грунтовых вод и деградацию пойменных экосистем.

Прогнозирование максимальных уровней стока рек имеет особую значимость, поскольку именно пиковые значения уровней представляют наибольшую угрозу для населения, объектов инфраструктуры, экономики, сельскохозяйственных угодий и других социально-экономических компонентов территории.

Актуальность настоящего исследования обусловлена тем, что в будущем риск наводнений или, наоборот, низкого стока будет сохраняться и усиливаться из-за природно-климатических изменений, антропогенного освоения территорий, приводящего к росту изменчивости основных факторов формирования половодья. Совершенствование заблаговременного прогноза характеристик весеннего половодья представляют собой одну из приоритетных задач как для теоретической науки, так и для практического применения [10–12, 18, 19].

Применение проходящих апробацию в Казахстане современных гидрологических моделей, таких как гидродинамическая модель MIKE 11 и гидравлическая модель HEC-RAS, сопряжены с рядом трудностей, обусловленных высокими требованиями моделей к входной морфометрической информации, прежде всего к детальному заданию рельефа, геологического строения, морфометрических характеристик русел и донной поверхности рек. Это, в свою очередь, требует значительных трудовых и финансовых затрат, что делает широкомасштабное использование подобных моделей в условиях рек Казахстана и условий обеспеченности исходной информацией на текущем этапе затруднительным [2].

Модели формирования стока HBV-light и SWIM показывают хорошее качество моделирования при применении на горных реках Казахстана

[6, 17, 19]. Для горных рек типично продолжительное половодье, обусловленное постепенным таянием снегов и ледников, а также дополнительным дождевым питанием.

Использование моделей формирования стока HBV-light и SWIM на равнинных территориях сталкиваются с определенными ограничениями – они не всегда корректно отражают кратковременное, но интенсивное половодье, происходящее за счет быстрого снеготаяния весной. Гидрологические процессы на равнинах протекают быстрее и резче, что усиливает влияние таких факторов, как испарение, инфильтрация и мелиоративные воздействия. Все это снижает точность гидрологических прогнозов.

Именно поэтому модели HBV-light и SWIM, показывающие высокое качество при моделировании горных рек, сталкиваются с ограничениями на равнинных территориях – они не всегда корректно отражают быстрое развитие и короткую продолжительность половодья.

Для создания методики долгосрочных гидрологических прогнозов с использованием моделей HBV-light и SWIM требуется ежедневное обеспечение численными прогнозами погоды на сроки от двух недель и более. На текущем этапе такие метеорологические прогнозы обладают ограниченной точностью и пространственной детализацией, особенно в условиях высокой климатической неоднородности Казахстана. Все это затрудняет применение этих моделей в вопросах долгосрочного прогнозирования максимальных уровней и объемов половодья [6, 17, 19].

В связи с этим произведено усовершенствование существующих методик гидрологических прогнозов путем внесения дополнительных факторов, характеризующих формирование весеннего стока. В качестве таких факторов рассмотрены продолжительность половодья, уровень воды на конец половодья предыдущего года и минимальный уровень зимнего стока, а также разность между ними [15], которая может служить индикатором процессов, происходящих в почвенно-грунтовой среде, таких как истощение или восстановление влагоемкости. Использование этих факторов в качестве предикторов при построении гидрологических прогнозов позволяет повысить точность и достоверность временных и количественных характеристик половодья для различных природно-климатических зон Казахстана [16].

В данной работе рассмотрены вопросы повышения точности прогноза максимальных уровней стока рек Жайык-Каспийского бассейна. Целью данной работы являлась разработка усовершенствованной регрессионной методики (модели) прогноза максимального уровня воды в период весеннего половодья рек Жайык-Каспийского бассейна.

Для достижения поставленной цели сформированы базы данных и определены расчетные характеристики за период 1980–2024 гг.:

– сформированы базы данных количества осадков за холодный период;

- температуры воздуха за период половодья по метеостанциям в пределах бассейнов;
- сформированы базы среднесуточных расходов воды рек;
- расходы воды на конец половодья;
- минимальный расход воды зимой;
- продолжительность половодья (дата начала, окончания периода половодья);
- максимальные уровни воды;
- рассчитаны разности между уровнями/расходами воды на конец половодья и минимальными уровнями/расходами зимнего стока, которые косвенно характеризуют наполнение или истощение влаги в почвогрунтах;
- получены регрессионные уравнения прогноза максимального уровня воды весеннего половодья для каждого гидрологического поста.

1. Материалы и методы исследования

1.1. Описание области исследования

Особенности распределения речной сети Жайык-Каспийского района обусловлены наличием на юго-западе Каспийского моря, а на северо-востоке – горных образований Южного Урала, поэтому реки здесь имеют общее направление течения с северо-востока на юго-запад. Основной рекой района является Жайык (Урал) общей длиной 2534 км и площадью 232 тыс. км². Река формируется на территории Российской Федерации, берет начало на Южном Урале, впадает в Каспийское море у г. Атырау. Длина реки в пределах Республики Казахстан составляет 1084 км, здесь она приобретает характер равнинной реки [7].

Реки Шаган и Деркул, берущие начало на Общем Сырте являются правобережными притоками Жайыка. Реки Сары и Кара Озени, Шыжын 1, Шыжын 2 и другие впадают в бессточные понижения Прикаспийской низменности. Реки Оленты, Булдырты, Калдыгайты, Ойыл, Сагыз, берущие начало у меловых гряд Предуралья, текут между водосборами Утвы, Б. Хобды (приток Елека) и р. Жем и теряются в бессточных озерах Прикаспийской низменности [4].

В рассматриваемом районе на территории Актюбинской области расположены три крупных водохранилища: Каргалинское, Актюбинское и Саздинское.

На Казахстанской части Жайык-Каспийского бассейна действуют 49 метеорологических и 54 гидрологических пункта наблюдений, представленных на рис. 1.

1.2. Исходные данные

Для данной работы использованы материалы многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений. Наблюденные данные гидрологических характеристик взяты из справочников «Ежегодные данные стока»

(ЕДС) и «Многолетние данные о стоке» для определения объемов половодья каждого года [8, 9, 13, 14, https://meteo.kazhydromet.kz/database_hydro/]. Данные метеорологических характеристик взяты из климатических справочников и базы данных РГП «Казгидромет» [https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/].

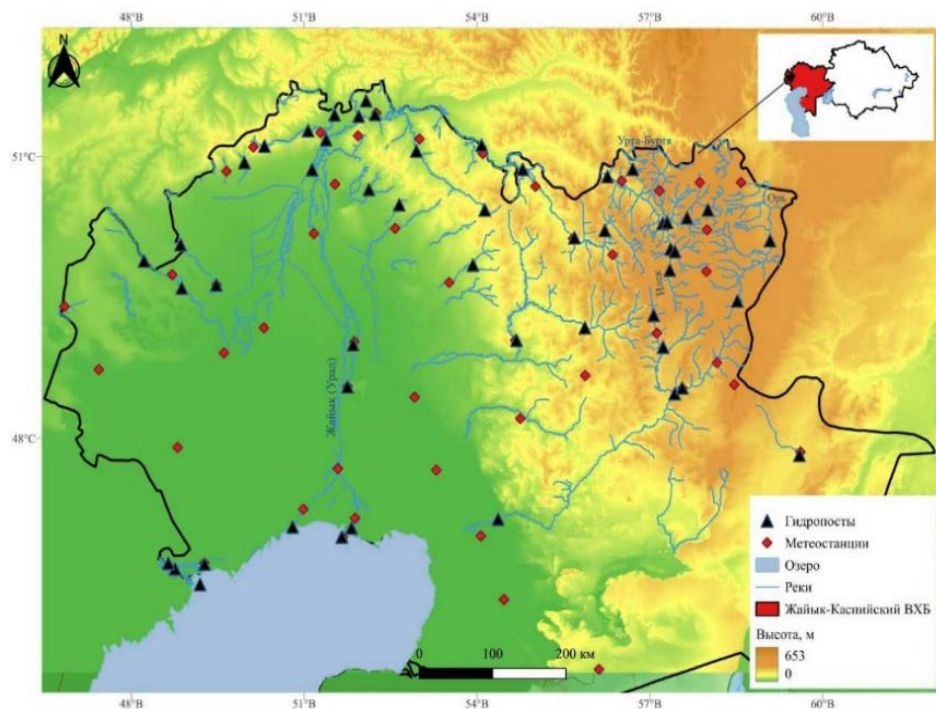


Рис. 1. Расположение наблюдательных пунктов на казахстанской части Жайык-Каспийского бассейна.

Fig. 1. Location of observation points on the Kazakh part of the Zhaiyk-Caspian basin.

1.3. Методика исследования

Для анализа зависимости максимальных уровней воды равнинных рек Жайык-Каспийского бассейна от ряда гидрометеорологических факторов применялся метод множественной регрессии [5].

Эффективность методики долгосрочного прогноза оценивалась с помощью критерия S/σ , где S – средняя квадратическая ошибка проверочных прогнозов; σ – среднее квадратичное отклонение прогнозируемой величины, то есть максимального уровня воды весеннего половодья [3].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Анализ зависимостей максимальных уровней стока от стокоформирующих факторов

Построенные парные коэффициенты корреляции максимальных уровней воды ($H_{\text{макс}}$) с осадками ($R_{\text{ХП}}$) за холодный период года (ноябрь–март) по 23 гидропостам рассматриваемых рек Жайык-Каспийского бассейна, где имеются ряды длительностью от 12 до 46 лет, показали неудовлетворительный результат (табл. 1).

Коэффициенты корреляции, оцениваемые как «удовлетворительные» и «неудовлетворительные», варьируются в пределах от 0,18 (река Чижа 1) до 0,58 (река Шаган) (табл. 1).

Включение в состав анализируемых факторов температурного режима весны, в частности максимальной температуры воздуха за апрель (T_{IV}), несколько улучшили корреляционные связи: коэффициенты множественной регрессии приняли значения от 0,20 (Чижа 1) до 0,73 (Утва). Вместе с тем для большинства рек данный показатель не достиг значения 0,70.

Известно, что одним из основных факторов, определяющих потери талого стока в период формирования половодья, является предзимнее увлажнение почв. Степень увлажнения почвогрунтов к началу зимнего периода оказывает существенное влияние на процессы инфильтрации и поверхностного стока во время весеннего снеготаяния. В связи с этим возникает необходимость качественной оценки влияния состояния почв на формирование стока, особенно при отсутствии прямых наблюдений за влажностью.

Для этой цели целесообразно использовать анализ гидрографа стока (рис. 2) по характерным точкам, что позволяет преобразовать качественные особенности стока в количественные показатели, отражающие влияние почвенно-грунтовых условий. Применение таких показателей в качестве предикторов в моделях прогноза половодья способствует улучшению корреляционных зависимостей и, как следствие, повышает достоверность и устойчивость гидрологических прогнозов.

В качестве индекса свободной емкости почвогрунтов был предложен следующий показатель: **разность между уровнем воды на конец половодья предыдущего года ($H_{\text{к.п.}}$) и минимальным уровнем воды ($H_{\text{мин}}$) перед началом половодья** $\Delta H = H_{\text{к.п.}}^{i-1} - H_{\text{мин}}^i$ которая являются косвенным показателем свободной емкости почвогрунтов перед половодьем [13].

В результате расчетов разниц $H_{\text{к.п.}}^{i-1} - H_{\text{мин}}^i$ были сформированы многолетние временные ряды данных ΔH , которые послужили одним из предикторов прогнозирования половодья. Включение рядов этого параметра в расчетную схему позволило существенно улучшить тесноту корреляционных связей характеристик моделей (от 0,60 до 0,70).

Учитывая, что оттаиванию снега все части региона подвергаются в среднем с начала апреля и активизация начинается в этот же период, температурный фактор анализа был дополнен максимальным значением

температуры воздуха за апрель месяц (T_{IVmax}). В результате показатели коэффициента корреляции и регрессионные статистики еще улучшились.

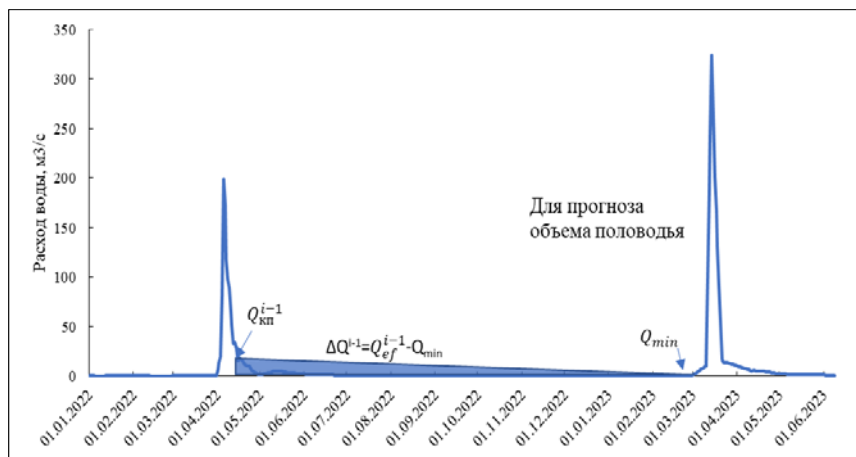


Рис. 2. Характерные точки гидрографа стока, применяемые в качестве предиктора в уравнениях множественной регрессии.

Fig. 2. Characteristic points of the runoff hydrograph used as predictors in multiple regression equations.

Как будет показано ниже, включение вышеуказанной характеристики в качестве одного из предикторов в структуру множественной регрессионной зависимости для оценки максимальных уровней воды позволило повысить коэффициент множественной регрессии до 0,25 для рек на территории Западно-Казахстанской области и до 0,35 для рек в Актюбинской области, доводя их значения до 0,85.

2.2. Проверка эффективности прогнозов на основе используемых зависимостей

При разработке методики гидрологического прогнозирования важно учитывать не только тесноту корреляционной связи между прогнозируемым параметром и предикторами, но и практическую применимость полученной зависимости. Даже при высокой корреляции метод может оказаться недостаточно надежным для оперативного прогнозирования, если не обеспечивается устойчивость результатов.

Для оценки эффективности предложенной методики при прогнозировании максимального уровня воды был рассчитан показатель эффективности S/σ [3], который позволяет объективно оценить эффективность предложенной методики относительно эффективности прогноза «по норме».

Уравнения для прогноза максимальных уровней воды рек Жайык-Каспийского бассейна представлены в табл. 1. Значения предикторов и результаты расчета показателя эффективности методики S/σ для всех рассматриваемых речных бассейнов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 1. Уравнения для прогноза максимальных уровней воды рек Жайык-Каспийского бассейна

Table 1. Equations for forecasting maximum water levels of rivers in the Zhaiyk-Caspian basin

Створ	Прогностическое уравнение
Западно-Казахстанская область	
р. Шаган – с. Чувашинское	$H_{\max} = 25,8 \cdot T_{IV} + 3,61 \cdot R_{IX-X} + 3,48 \cdot R_{XI-III} - 347$
р. Утва – с. Кентубек	$H_{\max} = 9,60 \cdot T_{IV} + 1,21 \cdot R_{IX-X} + 1,77 \cdot R_{XI-III} + 3,51 \cdot \Delta H - 111$
р. Утва – с. Лубенка	$H_{\max} = 0,63 \cdot R_{IX-X} + 1,08 \cdot R_{XI-III} + 22,8 \cdot T_{IV} + 0,44 \cdot H_{\min} - 485$
р. Чижа 2 – с. Чижа 2	$H_{\max} = 0,96 \cdot R_{XI-III} + 2,21 \cdot R_{IX-X} + 2,97 \cdot T_{IV} + 0,32 \cdot H_{\min} + 201$
р. Чижа 1 – с. Чижа 1	$H_{\max} = 1,56 \cdot R_{XI-III} + 1,94 \cdot R_{IX-X} - 9,00 \cdot T_{IV} - 3,25 \cdot L + 511$
р. Шидерты – с. Аралтобе	$H_{\max} = 1,66 \cdot R_{IX-X} + 1,14 \cdot R_{XI-III} + 14,3 \cdot T_{IV} - 222$
р. Оленты – с. Жымпиты	$H_{\max} = 1,20 \cdot R_{XI-III} + 1,24 \cdot R_{IX-X} + 19,6 \cdot T_{IV} - 392$
р. Куперанкаты – с. Алгабас	$H_{\max} = 1,76 \cdot R_{XI-III} + 20,1 \cdot T_{IV} + 1,49 \cdot R_{IX-X} - 0,63 \cdot H_{\min} + 0,78 \cdot Q_{\max} - 268$
Актюбинская область	
р. Б. Кобда – с. Кобда	$H_{\max} = 1,24 \cdot R_{IX-X} + 0,30 \cdot R_{XI-III} + 0,66 \cdot T_{IV} + 1,19 \cdot \Delta W - 1,81 \cdot L + 373$
р. Б. Кобда – с. Когалы	$H_{\max} = 2,36 \cdot R_{IX-X} + 3,59 \cdot R_{XI-III} + 16,7 \cdot T_{IV} + 37,2 \cdot \Delta W - 496$
р. Карахобда – с. Альпасай	$H_{\max} = 1,33 \cdot R_{IX-X} + 0,21 \cdot R_{XI-III} + 8,64 \cdot T_{IV} + 1,39 \cdot Q_{КП} - 2,95 \cdot L + 397$
р. Косистек – с. Косистек	$H_{\max} = 1,81 \cdot R_{IX-X} + 3,99 \cdot T_{IV} + 0,31 \cdot R_{XI-III} - 2,06 \cdot L + 92,76 \cdot \Delta W + 177$
р. Орь – с. Бугетсай	$H_{\max} = 2,84 \cdot R_{XI-III} + R_{XI-III} + 2,38 \cdot R_{IX-X} + 5,61 \cdot T_{IV} - 451 \cdot Q_{\min} + 108$
р. Урта-Буртя – с. Дмитриевка	$H_{\max} = -1,97 \cdot L + 7,95 \cdot T_{IV} + 0,75 \cdot R_{XI-III} + 0,12 \cdot R_{IX-X} - 280 \cdot Q_{\min} + 205$
р. Карагала – с. Каргалинское	$H_{\max} = 2,77 \cdot R_{IX-X} + 1,34 \cdot R_{XI-III} + 2,73 \cdot T_{IV} + 1,12 \cdot H_{\min} - 118$
р. Илек – с. Целинное	$H_{\max} = 7,11 \cdot T_{IV} + 1,41 \cdot R_{XI-III} + 1,86 \cdot R_{IX-X} + 1,33 \cdot H_{КП} - 3,24 \cdot L - 173$
р. Илек – г. Актобе	$H_{\max} = 0,51 \cdot R_{XI-III} + 1,26 \cdot R_{IX-X} - 6,61 \cdot T_{IV} + 1,67 \cdot H_{\min} + 61,73$
р. Уил – с. Уил	$H_{\max} = 1,74 \cdot R_{XI-III} + 8,37 \cdot T_{IV} + 1,06 \cdot R_{IX-X} + 271$
р. Темир – с. Сагашили	$H_{\max} = 0,63 \cdot R_{XI-III} + 9,89 \cdot T_{IV} + 1,92 \cdot R_{IX-X} + 24,3 \cdot Q_{\min} + 0,81 \cdot H_{КП} - 2,38 \cdot L - 50$
р. Темир – с. Ленинское	$H_{\max} = 1,01 \cdot R_{XI-III} + 10,6 \cdot T_{IV} - 0,13 \cdot R_{IX-X} - 5,04 \cdot L + 251$
р. Эмба – с. Жагабулак	$H_{\max} = 2,95 \cdot Q_{КП} + 1,32 \cdot R_{XI-III} - 1,35 \cdot T_{IV} + 0,93 \cdot R_{IX-X} - 1,89 \cdot L + 332$

Примечание к табл. 1–3: R – количество атмосферных осадков; T_{IV} – максимальная температура воздуха за апрель; $H_{КП}$ – уровень воды в конце половодья предыдущего года; H_{\min} – минимальный уровень воды за зиму; ΔH – разница между уровнями; L – продолжительность половодья; Q_{\min} – минимальный расход воды в период зимней межени; $Q_{КП}$ – расход воды на дату конца половодья; Q_{\max} – максимальный расход воды в период предыдущего половодья. Знак «/» в шапке таблицы означает «или-или».

Таблица 2. Оценка эффективности уравнений для прогноза максимальных уровней воды рек Западно-Казахстанской области**Table 2.** Equations for forecasting maximum water levels of rivers in the West Kazakhstan Region

R_{IX-III}	Предикторы						r	S/σ
	$T + R_{IX-III}$	$T + R_{IX-III} + \Delta H$	$T + R_{IX-III} + H_{кр} + H_{min}$	$T + R_{IX-III} + \Delta H + L$	$T + R_{IX-III} + H_{кр} + H_{min} + L$	$T + R_{IX-III} + L / Q_{min} / H_{min} / Q_{кр} / Q_{max}$		
р. Шаган – с. Чувашинское, период 2008–2024 гг. (16 лет)								
0,58	0,77	0,69	0,69	0,7	0,7		0,77	0,68
р. Утва – с. Кентубек, период 2012–2024 гг. (12)								
0,34	0,7	0,75	0,78	0,85	0,83		0,75	0,73
р. Утва – с. Лубенка, период 2010–2024 гг. (14)								
0,51	0,75	0,74	0,8	0,76	0,83	0,76	0,76	0,74
р. Чижа 2 – с. Чижа 2, период 2005–2024 гг. (19)								
0,46	0,59	0,49	0,76	0,56	0,61		0,76	0,71
р. Чижа 1 – с. Чижа 1, период 2010–2024 гг. (14)								
0,18	0,61	-	-	-	-	0,85	0,85	0,59
р. Шидерты – с. Аралтобе, период 2006–2024 гг. (18)								
0,36	0,75	-	-	-	-		0,75	0,7
р. Оленты – с. Жымпиты, период 2010–2024 гг. (14)								
0,45	0,75	-	-	-	-		0,75	0,72
р. Куперанкаты – с. Алгабас, период 2000–2024 гг. (24)								
0,45	0,46	0,61	0,6	0,61	0,6	0,71	0,71	0,69

Также необходимо подчеркнуть, что в данной работе ввиду ограниченности ряда наблюдений проверка построенной модели уравнения множественной регрессии осуществлена методом верификации в котором при определенных условиях позволяющий ограничиться проверкой методики на зависимом материале, образованном теми же данными многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений [1].

Проведенная оценка критерия эффективности S/σ показала, что для рек Западно-Казахстанской области для всех рассматриваемых гидрологических постов, за исключением бассейна р. Утва, эффективность полученных прогностических уравнений хорошая и удовлетворительная в соответствии с Наставлением [3]. Полученный результат указывает на ограниченную надежность уравнений в бассейнах р. Утва и необходимость последующего совершенствования методики – пересмотра состава предикторов.

Таблица 3. Оценка эффективности уравнений для прогноза максимальных уровней воды рек Актюбинской области

Table 3. Equations for forecasting maximum water levels of rivers in the Aktobe region

R_{IX-III}	Предикторы						r	S/σ
	$T + R_{IX-III}$	$T + R_{IX-III} + \Delta H$	$T + R_{IX-III} + H_{кр} + H_{min}$	$T + R_{IX-III} + \Delta H + L$	$T + R_{IX-III} + H_{кр} + H_{min} + L$	$T + R_{IX-III} + L / Q_{min} / H_{min} / Q_{кр} / Q_{max}$		
р. Б. Кобда – с. Кобда, период 1978-2024 гг. (46 лет)								
0,31	0,47	0,3	0,47	0,69	0,61		0,69	0,76
р. Б. Кобда – с. Когалы, период 2008-2024 гг. (16 лет)								
0,4	0,67	0,74	0,48	0,7	0,64		0,74	0,73
р. Карахобда – с. Альпасай, период 1987–2024 гг. (37)								
0,29	0,46	0,38	0,38	0,79	0,81		0,81	0,61
р. Косистек – с. Косистек, период 2000–2024 гг. (24)								
0,23	0,65	0,4	0,41	0,8	0,6		0,8	0,66
р. Орь – с. Бугетсай, период 1980–2024 гг. (44)								
0,58	0,69	-	-	-	-	0,72	0,72	0,74
р. Урта-Буртя – с. Дмитриевка, период 2007–2024 гг. (17)								
0,25	0,44	0,44	0,45	0,7	0,81		0,8	0,66
р. Карагала – с. Каргалинское, период 1980–2024 гг. (44)								
0,39	0,64	-	0,7	-	-		0,7	0,73
р. Илек-с. Целинное, период 2003–2024 гг. (21)								
0,33	0,61	0,35	0,52	0,5	0,75		0,75	0,75
р. Илек – г. Актобе, период 1942–1974 гг. (32)								
0,2	0,61				-	0,77	0,77	0,66
р. Уил – с. Уил, период 2000–2024 гг. (24)								
0,64	0,72	-	-	-	-		0,74	0,72
р. Темир – с. Сагашили, период 1998–2024 гг. (26)								
0,35	0,61	-	-	-	-	0,75	0,75	0,76
р. Темир – с. Ленинское, период 2006–2024 гг. (18)								
0,54	0,57					0,73	0,73	0,75
р. Эмба – с. Жагабулак, период 2006–2024 гг. (18)								
0,6	0,65	0,65	0,57	0,71	0,72		0,72	0,76

Для речных бассейнов Актюбинской области (табл. 2) значения критерия S/σ свидетельствует о приемлемой прогностической ценности методики. Исключение составляет бассейн реки Эмба, где превышение порогового значения 0,75 указывает на недостаточную надежность методики и необходимость дальнейшего повышения качества используемых зависимостей.

Для оценки правильности отражения реальности прогнозируемых и наблюдаемых значений были сопоставлены результаты модели (прогнозов) с наблюдаемыми фактическими данными максимальных уровней воды рек Жайык-Каспийского бассейна которые представлены на рис. 3 и рис. 4.

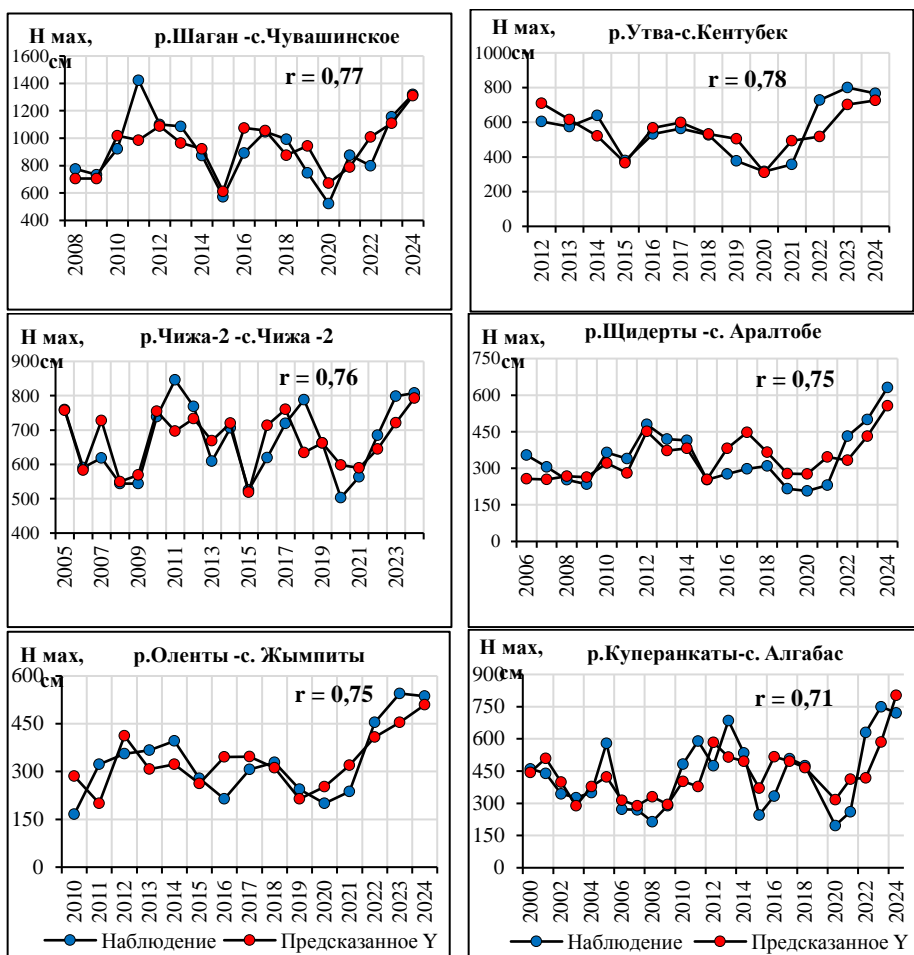


Рис. 3. Наблюдаемые и прогнозные максимальные уровни воды рек Западно-Казакстанской области.

Fig. 3. Observed and forecast maximum water levels of rivers in West Kazakhstan Region.

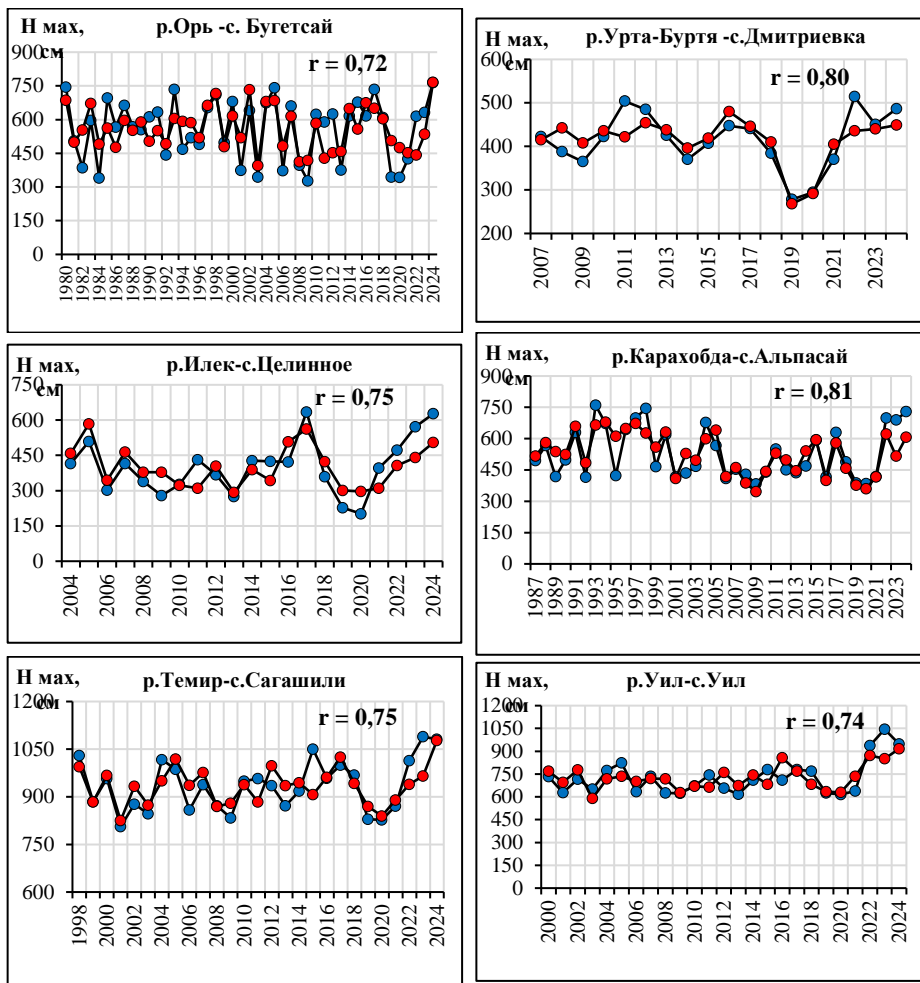


Рис. 4. Наблюдаемые и прогнозные максимальные уровни воды рек Актыубинской области.

Fig. 4. Observed and forecast maximum water levels of rivers in the Aktyubinsk region.

Полученные уравнения, представленные в табл. 1, уточненные с использованием множественного корреляционного анализа данных, имеют коэффициенты множественной корреляции r в диапазоне от 0,69 до 0,85.

Таким образом, в целом результаты оценки корреляционных связей и S/σ подтверждают, что разработанная методика обладает достаточной степенью применимости для большинства исследованных речных бассейнов и, следовательно, может быть применена в прогностической практике, в нашем случае при прогнозировании максимальных уровней воды в период весеннего половодья.

Заключение

В настоящем исследовании произведено усовершенствование существующих методик гидрологических прогнозов путем внесения дополнительных факторов, характеризующих формирование весеннего стока. В качестве таких факторов рассмотрены продолжительность половодья, а также предложено учитывать разность между расходом воды на конец половодья предыдущего года и минимальным расходом воды за зиму текущего года. Данная величина косвенно характеризует насыщение влагой почвогрунтов во время половодья и, соответственно, определяет потенциальные потери талого стока на впитывание в почву. Учет данного фактора позволил существенно уточнить используемые зависимости – значения коэффициентов множественной регрессии выросли до значений 0,8 и более.

Верификация на независимой выборке с расчетом критерия эффективности показала хорошее и удовлетворительное качество прогноза максимального уровня воды. Это позволяет рекомендовать полученные методики к использованию в практике оперативных гидрологических прогнозов характеристик весеннего половодья рек казахстанской части Жайык-Каспийского бассейна.

Список литературы

1. *Богущая Е.М., Косицкий А.Г., Айбулатов Д.Н., Гречушникова М.Г.* Средний многолетний сток рек юго-западной части Крымского полуострова // Водное хозяйство России. 2020. № 2. С. 37-51. DOI: DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-3
2. *Болатова А. А., Тіллэкәрім Т. А., Раимжанова М. Н.* Применение гидрологической модели HBV для прогнозирования стока рек на примере бокового притока воды в Шульбинское водохранилище // Гидрометеорология и экология. 2019. №. 3 (94). С. 26-43.
3. *Наставление* по службе прогнозов. Раздел 3. Служба гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1962.
4. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. Том. VII. Ресурсы речного стока Казахстана. Кн. 1. Возобновляемые ресурсы поверхностных вод Западного, Северного, Центрального и Восточного Казахстана: монография / Под науч. ред. Р.И. Гальперина. Алматы, 2012. 684 с.
5. *Соколовский Д. Л.* Речной сток. (Методы исследований и расчетов): Учебное пособие. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 539 с.
6. *Тиллакарим, Т., Серикбай, Н., Сатмурзаев, А., & Сауров, С.* Моделирование стока горных рек Илейского Алатау с применением модели HBV-light // Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов. 2024. Том 10, № 1. Р. 1-20.
7. *Шульц В.Л.* Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 691 с.
8. Annual Data on the Regime and Resources of Land Surface Waters. Vol. 6. Kara Sea Basin (Western Part). Is. 4–9, 1950–1979. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. Available online: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyny-tek-ertis-irtysh-esil-ishim-tobol-verhneetechenie-mds-1938-2020>.
9. Annual Data on the Regime and Resources of Surface Water of Land. Is. 1. UST-Kamenogorsk, Kazakhstan, 2002–2021. Available online: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyn-reki-ertis-2002-2021>
10. *Chen H., & Li X.* Impact of Climate Change on the Frequency and Intensity of Hydrological Extremes in Central Asia // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 598. P. 126310. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126310

11. Immerzeel, W.W., Lutz, A.F., Andrade, M. et al. Importance and vulnerability of the world's water towers // *Nature*. 2020. Vol. 577. P. 364-369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
12. Kauzov A., Tillakarim T., Salnikov V., Polyakova S. Assessment of changes in the area of snow cover in Kazakhstan from 2000 to 2022 // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2023. Vol. 20, no. 1. C. 298-305.
13. Long-Term Data About the Regime and Resources of Surface Water on Land. Book 1, Issue 1. Almaty, Kazakhstan, 2002. Available online: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyny-rek-ertis-irtysh-esil-ishim-tobol-verhnee-techenie---mds-1938-2020>
14. Resources of Surface Waters of Areas for the Development of Virgin and Fallow Lands, Issue 1. Akmola region of the Kazakh SSR. Leningrad: State Hydrological Institute, 1958.
15. Sairov, S.B.; Serikbay, N.T.; Rodrigo-Illarri, J.; Abdрахимов, R.G.; Rodrigo-Clavero, M.E. Climate-Driven Changes in Annual Flow Patterns: A Comprehensive Analysis of the Buktyrma River (Kazakhstan) // *Water*. 2024. Vol. 16. P. 1114. Doi: 10.3390/w16081114
16. Sairov, S., Tillakarim, T., & Serikbay, N. Some points of improvement of flood volume forecasting under limited hydrometeorological data // *Hydrometeorology and Ecology*. 2024. Vol. 3. P. 7-19. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-114-3-7-19>
17. Serikbay, N.T.; Tillakarim, T.A.; Rodrigo-Illarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.E., Duskeyev, K.K. Evaluation of Reservoir Inflows Using Semi-Distributed Hydrological Modeling Techniques: Application to the Esil and Moildy Rivers' Catchments in Kazakhstan // *Water*. 2023. Vol. 15. P. 2967. <https://doi.org/10.3390/w15162967>
18. Tillakarim T., Kauzov A., Gafurov A., Sairov S. Spatial and temporal variation of water reserves in snow cover in the Nura-Sarysu water basin // *Izdenister Natigeler*. 2023. Vol. 3, no. 99. P. 292-307. <https://doi.org/10.37884/3-2023/30>
19. Tillakarim T., Serikbay N., Rakishev D., Sairov S. Modeling river runoff of literal tributaries of the Buktyrma reservoir with using HBV model // *Journal of Geography & Environmental Management*. 2023. Vol. 70, no. 3. doi.org/10.26577/JGEM.2023.v70.i3.08

References

1. Bogutskaya E.M., Kositskiy A.G., Aybulatov D.N., Grechushnikova M.G. Mean Annual Runoff of the Rivers of the Crimean Peninsula Southwest. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management]. 2020, no. 2, pp. 37-51. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-3. [in Russ.].
2. Bolatova A. A., Tillakarim T. A., Raimzhanova M. N. Primenenie gidrologicheskoy modeli HBV dlya prognozirovaniya stoka rek na primere bokovogo pritoka vody v Shul'binskoe vodohranilishche. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, 2019, vol. 94, no. 3, pp. 26-43 [in Russ.].
3. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. Sluzhba gidrologicheskikh prognozov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1962. [in Russ.].
4. Vodnye resursy Kazahstana: ocenka, prognoz, upravlenie. Tom. VII. Resursy rechnogo stoka Kazahstana. Kn. 1. Vozobnovlyaemye resursy poverhnostnykh vod Zapadnogo, Severnogo, Central'nogo i Vostochnogo Kazahstana: monografiya. Almaty, 2012, 684 p. [in Russ.].
5. Sokolovskiy D.L. Rechnoy stok. (Metody issledovaniy i raschetov): Uchebnoe posobie. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1968, 539 p. [in Russ.].
6. Tillakarim T., Serikbay N., Satmurzaev A., Sairov S. Modelirovanie stoka gornyh rek Ilejskogo Alatau s primeneniem modeli HBV-light [HBV-modeling of the Ile Alatau mountain river flow]. *Central Asian Journal of Water Research*. 2024, vol. 10, no. 1, pp. 1-20. DOI: 10.29258/CAJWR/2024-R1.v10-1/1-20.rus [in Russ.].
7. Spul'c V.L. Reki Sredney Azii [Rivers of Central Asia]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1965, 691 p. [in Russ.].
8. Annual Data on the Regime and Resources of Land Surface Waters. Vol. 6. Kara Sea Basin (Western Part). Is. 4-9, 1950-1979. Leningrad, Gidrometeoizdat publ, 1968. Available at: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyny-rek-ertis-irtysh-esil-ishim-tobol-verhnee-techenie-mds-1938-2020>.

9. Annual Data on the Regime and Resources of Surface Water of Land. Is. 1. UST-Kamenogorsk, Kazakhstan, 2002–2021. Available at: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyn-reki-ertis-2002-2021>

10. Chen H., & Li X. Impact of Climate Change on the Frequency and Intensity of Hydrological Extremes in Central Asia. *Journal of Hydrology*. 2021, vol. 598, pp. 126310. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126310.

11. Immerzeel. W.W., Lutz, A.F., Andrade. M. et al. Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 2020, vol. 577, pp. 364-369. DOI: 10.1038/s41586-019-1822-y

12. Kauazov A., Tillakarim T., Salnikov V., Polyakova S. Assessment of changes in the area of snow cover in Kazakhstan from 2000 to 2022. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2023, vol. 20, no. 1, pp. 298-305.

13. Long-Term Data About the Regime and Resources of Surface Water on Land. Book 1, Issue 1. Almaty, Kazakhstan, 2002. Available at: <https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/basseyny-rek-ertis-irtysh-esil-ishim-tobol-verhnee-techenie---mds-1938-2020>.

14. Resources of Surface Waters of Areas for the Development of Virgin and Fallow Lands, Issue 1. Akmola region of the Kazakh SSR. Leningrad, State Hydrological Institute, 1958

15. Sairov. S.B.; Serikbay, N.T.; Rodrigo-Illarri, J.; Abdrakhimov, R.G.; Rodrigo-Clavero, M.E. Climate-Driven Changes in Annual Flow Patterns: A Comprehensive Analysis of the Buktyrma River (Kazakhstan). *Water*. 2024, vol. 16, pp. 1114. DOI: 10.3390/w16081114

16. Sairov. S., Tillakarim, T., & Serikbay. N. Some points of improvement of flood volume forecasting under limited hydrometeorological data. *Hydrometeorology and Ecology*. 2024, vol. 3, pp. 7-19. DOI: 10.54668/2789-6323-2024-114-3-7-19

17. Serikbay. N.T.; Tillakarim. T.A.; Rodrigo-Illarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.E., Duskayev, K.K. Evaluation of Reservoir Inflows Using Semi-Distributed Hydrological Modeling Techniques: Application to the Esil and Moildy Rivers' Catchments in Kazakhstan. *Water*. 2023, vol. 15, pp. 2967. DOI: 10.3390/w15162967

18. Tillakarim T., Kauazov A., Gafurov A., Sairov S. Spatial and temporal variation of water reserves in snow cover in the Nura-Sarysu water basin. *Izdenister Natigeler*. 2023, vol. 3, no. 99, pp. 292-307. DOI: 10.37884/3-2023/30

19. Tillakarim T., Serikbay N., Rakishev D., Sairov S. Modeling river runoff of literal tributaries of the Buktyrma reservoir with using HBV model. *Journal of Geography & Environmental Management*. 2023, vol. 70, no. 3. DOI: 10.26577/JGEM.2023.v70.i3.08

Поступила 18.09.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 18.09.2025; accepted for publication 26.11.2025.