



Оценка рисков наводнений и паводков в целях устойчивого развития в бассейне реки Жабай (Казахстан)

Калашникова О.Ю. ^a, Нурбацина А.А. ^b, Ниязов Дж.Б. ^c

^a Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, ул. Тимура Фрунзе, д. 73/2, г. Бишкек, 720027, Кыргызская Республика

^b Институт географии и водной безопасности Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, ул. Пушкина, 99, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан

^c Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии национальной Академии наук Республики Таджикистан, ул. Айни, д. 14а, г. Душанбе, 734042, Республика Таджикистан

ABSTRACT

На примере бассейна р. Жабай проведено исследование климатических и гидрологических изменений, дана оценка степени опасности наводнений и возможности их предупреждения и прогнозирования. С 2000 г. в Казахстане наблюдается период стабильного повышения температуры воздуха. В бассейне р. Жабай в этот период наблюдалось сильное наводнение (2014 г.) и разрушительные волны (2017 г.), которые привели к угрозе жизни населения г. Атбасар, расположенного в устье реки. Применение гидравлического моделирования HEC-RAS показало, что степень опасности в восточной части г. Атбасар оценивается как экстремальная (кризисная), а в южной как высокая. Прогноз климатических изменений на 2030 и 2040 гг., составленный с помощью регрессионных уравнений, показал, что в этом речном бассейне дальнейший рост температуры воздуха и осадков приведет к повышению температуры на 0,8-2,2 °С и осадков на 7-22% от среднееголетних значений. Эти расчеты показывают, что в будущем продолжительность теплого периода, интенсивность таяния снега, а также количество выпадающих осадков будет увеличиваться. В статье представлена оценка краткосрочных гидрологических прогнозов, составленных с применением гидрологической модели SWIM (Soil and Water Integrated Model). Полученные результаты показывают, что оправдываемость прогнозов водности на период паводка на примере независимых проверочных лет (2019 и 2020 гг.) составила 81-86 %. Таким образом, данная модель может применяться в оперативной практике для составления краткосрочных прогнозов расхода и объема воды. Приведенные параметры оптимизации позволяют также использовать эту модель для среднесрочных, долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов водности р. Жабай. Результаты проведенного исследования предназначены для лиц, принимающих решения по перспективному планированию водных ресурсов в условиях изменения климата. Также результаты могут использоваться водохозяйственными, коммунально-бытовыми службами и органами по чрезвычайным ситуациям для принятия превентивных мер по защите населения, строительству противопаводковых и других инженерно-технических сооружений.

Подана в редакцию:
28 апреля 2023

Принята к публикации:
4 мая 2023

Доступ онлайн:
2 июня 2023

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

изменение климата, водные ресурсы, краткосрочное прогнозирование, гидрологическое моделирование, гидравлическое моделирование, SWIM, HEC-RAS, река Жабай, Казахстан, Центральная Азия.

Для корреспонденции: Калашникова О. ✉ o.kalashnikova@caiaq.kg Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, ул. Тимура Фрунзе, д. 73/2, г. Бишкек, 720027, Кыргызская Республика

1. Введение

Глобальное потепление, которое с середины 70-х годов прошлого столетия идет высокими темпами, приводит к увеличению продолжительности теплого периода, интенсивному таянию сезонного снега и увеличению числа паводковых и селевых явлений на реках Центральной Азии. Периодичность критических аномалий выпадения осадков либо резкое таяние снежного покрова при «дружности» весны могут привести к формированию или слишком большого, или слишком маленького объема водных ресурсов, следствием которого являются наводнения или засухи (Руководство по гидрологической практике, 2012).

Температурный режим Казахстана показывает значения стабильно выше нормы с 2000 г. Каждый год на протяжении 18 лет, начиная с 2001 г., был как минимум на 0,4 °С теплее в сравнении со средним значением за 1961-1990 гг. Глобальные температуры продолжают соответствовать тенденции к потеплению на 0,1-0,2 °С за десятилетие (рис. 1) (Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2016 г., 2017).

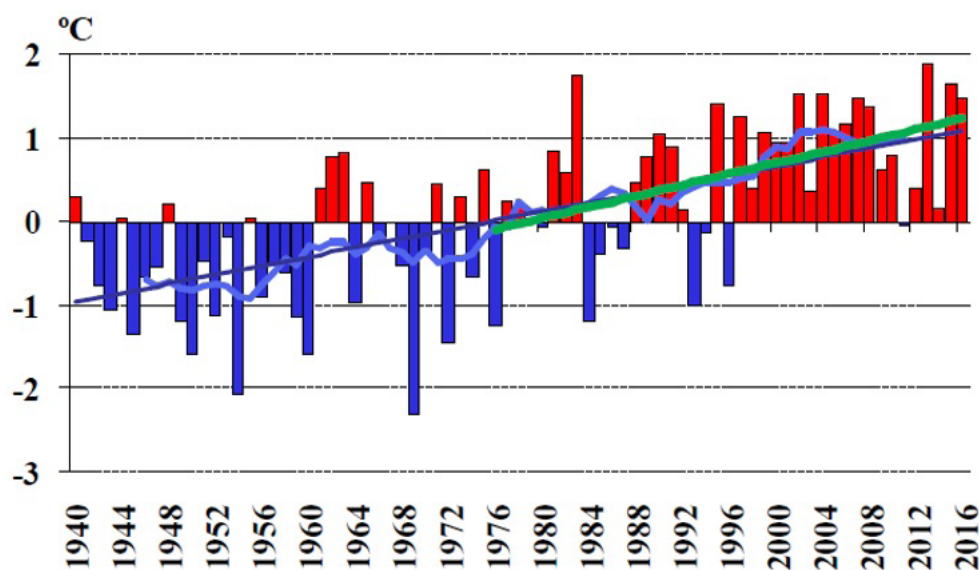


Рис. 1. Линейный тренд аномалий годовых температур воздуха за период 1941-2016 гг. (синяя линия) и за период 1976-2016 гг. (зеленая линия), осреднённых по территории Казахстана. Аномалии рассчитаны относительно базового периода 1961-1990 гг. Сглаженная кривая получена 11-летним скользящим осреднением. Источник: Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2016 г.

В данном исследовании был выбран речной бассейн Жабай, где в 2014 и 2017 гг. отмечались наводнения, приведшие к подтоплению домов и вынужденной

эвакуации населения г. Атбасар. Самое большое наводнение за всю историю г. Атбасар, связанное со значительным потеплением и интенсивным таянием степных талых вод и приведшее к подтоплению 559 домов на 12 улицах города, произошло в апреле 2014 г. (Косенов, 2014; Дюсекеева, 2022) (рис. 2).

В апреле 2017 г. резкое повышение уровня воды до 6,1 м произошло под влиянием ливневого дождя и ветра, которые создали разрушительную волну. В результате наводнения в четырех местах была смыта защитная дамба и подтоплены более 400 домов, из зоны бедствия были эвакуированы 1374 человек (Садвакасов, 2021; Бекетова, 2023) (рис. 3а, 3б). При этом в 2017 г. уровень воды в р. Жабай поднялся на 80 см выше, чем в 2014 г. и на 2,6 м выше своего критического значения (3,45 м).



Рис. 2. Подтопленный г. Атбасар после наводнения в апреле 2014 г.



a)



б)

Рис. 3а, 3б. Наводнения в г. Атбасар в апреле 2017 г. в результате прорыва защитной дамбы

Сток р. Жабай отличается сильно выраженной межсезонной и межгодовой изменчивостью. В разные годы расходы воды могут различаться в десятки и сотни раз, что значительно осложняет хозяйственное использование водных ресурсов в ее бассейне. В связи с этим остро стоит вопрос о заблаговременном предупреждении наводнений и оперативном предупреждении об опасности наводнений и принятии превентивных мероприятий органами управления, сил и средств МЧС Казахстана и местной исполнительной властью - акиматами, а также водохозяйственными организациями и коммунально-бытовыми службами.

Целью данного исследования является оценка качества краткосрочных гидрологических прогнозов с применением гидрологической модели SWIM (Soil and Water Integrated Model) и картирование наводнений с применением одномерной гидравлической модели HEC-RAS 6.3.1.

Для этого были поставлены следующие задачи: 1) оценка изменения климатических факторов для выявления их тенденций на будущее; 2) оценка динамики стока реки; 3) калибровка модели SWIM для речного бассейна Жабай; 4) оценка качества краткосрочных прогнозов водности на период паводка; 5) картирование территории бассейна, подвергающейся наводнению (затоплению) в период паводков.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Объекты и материалы исследования

Площадь водосбора р. Жабай составляет 8530 км², по данным гидропоста г. Атбасар, средний многолетний расход воды за период наблюдений с 1936 по 2019 г. составил 8,15 м³/с. Наибольший расход воды наблюдался 11 апреля 2014 г. и составил 1750 м³/с, наименьший расход воды составил 0,5 м³/с (в период открытого русла, 8 августа 1969 г.) и 0,95 м³/с (в зимний период, 3 апреля 1969 г.).

Для оценки климатических изменений (температуры воздуха и суммы осадков) и для гидрологического моделирования были использованы метеорологические данные сети наблюдений Казгидромета - Балкашино, Атбасар, Жалтыр, Акколь и Щучинск. Для гидрологического моделирования в SWIM были использованы следующие метеорологические параметры: максимальная, минимальная и средняя температура воздуха, сумма осадков, относительная влажность, суммарная солнечная радиация и средняя скорость ветра. Сведения об используемом периоде наблюдений, географических координатах и высоте метеостанций/гидропоста представлены в таблице I. Местоположение бассейна р. Жабай на территории Казахстана и расположение метеостанций/гидропоста отмечены на рис. 4.

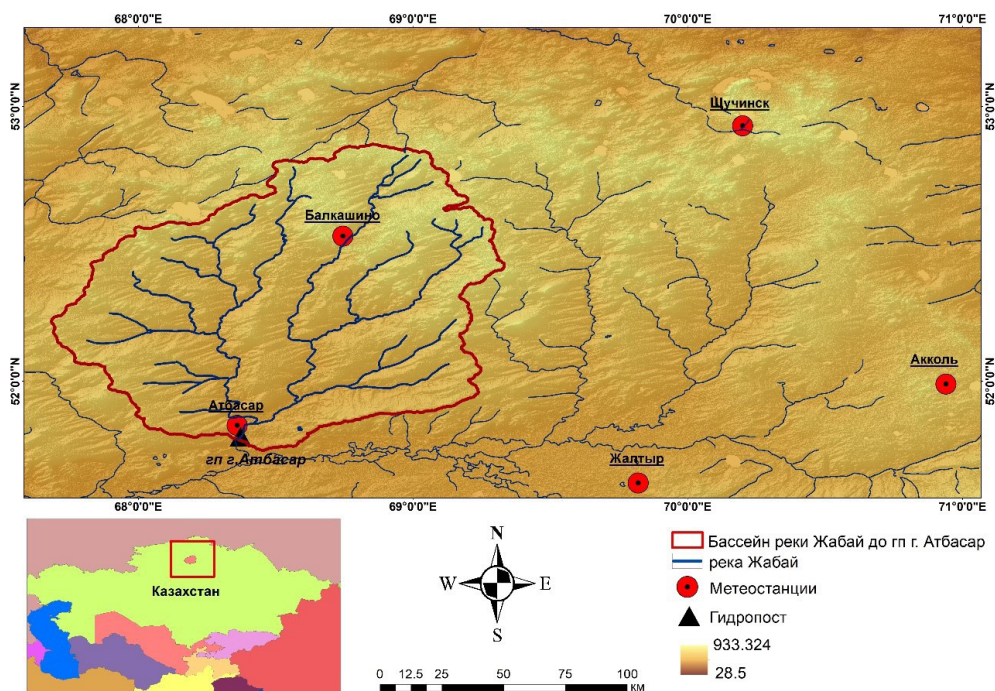


Рис. 4. Местоположение бассейна р. Жабай на территории Казахстана и расположение метеостанций и гидропоста

Таблица I. Сведения о периоде наблюдений, координатах и высоте метеостанций и гидропоста

Наименование станции / гидропоста	Период наблюдений	Долгота	Широта	Высота, м н.у.м
Акколь	1980-2019	70.94	51.99	383
Атбасар	1980-2019	68.36	51.84	302
Балкашино	1980-2019	68.74	52.53	398
Жалтыр	1980-2019	69.82	51.63	304
Щучинск	1980-2019	70.20	52.93	393
р. Жабай - г. Атбасар	1984-2019	68.37	51.79	272

Для подготовки входящей информации в SWIM были взяты карты высотных зон, типов почв, землепользования и растительности. Для подготовки карты высотных зон была использована цифровая модель рельефа SRTM с пространственным разрешением 30 x 30 м. Карта типов почв была подготовлена на основе данных FAO Soils portal (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023). Карты землепользования/растительности были использованы по данным проекта «Globe Land 30» за 2014 г. на базе многолетних серий за период

2009-2011 гг., спутниковых снимков проекта «Landsat» с пространственным разрешением 30 м. В цифровом виде в конце 2015 г. карты землепользования globeland30.org стали полностью доступны и содержат более детальное деление на классы (GlobeLand30: Publicly available Global Geo-information Product, 2023).

2.2. Методология использования гидрологической модели SWIM

В данной работе была апробирована немецкая гидрологическая модель SWIM (Soil and Water Integrated Model), разработанная в Потсдамском институте исследований воздействия на климат (Potsdam Institute for Climate Impact Research, Germany) (Krysanova et al., 1996). Гидрологическая модель SWIM производит расчеты в программном обеспечении GRASS GIS, находящегося в открытом доступе в интернете (GRASS GIS. Система поддержки анализа географических ресурсов, 2023). Для работы с гидрологическим моделированием было использовано пользовательское руководство GRASS 4.1 (GRASS 4.1 Reference Manual, 1993).

В основе расчетов лежит деление всего исследуемого бассейна на гидротопы - участки с относительно однородными условиями и показателями стока, включающие в себя единые характеристики почв и землепользования.

Для ввода модели в оперативную практику необходимо ее тщательное тестирование и проверка результатов на качество. При проведении тестирования были решены следующие задачи:

- адаптация гидрологической модели SWIM к условиям исследуемой реки;
- получение прогностической метеорологической информации и обработка формата данных в RStudio;
- проведение калибровки и верификации модели;
- разработка автоматических процедур для составления прогнозов;
- оценка качества прогнозов.

Для проведения калибровки модели для речного бассейна учитываются более 35 параметров, основными из которых являются:

- коэффициенты шероховатости русла;
- параметры максимальной водоемкости почвы;
- параметры испарения;
- параметры грунтовых вод;
- параметры эрозии почвы;
- параметры первоначального запаса влаги в грунтах;
- параметры русла, канала;
- параметры снегонакопления и снеготаяния;
- коэффициенты изменения характеристик с высотой;
- параметры поймы реки.

Оценка качества методики для краткосрочного гидрологического прогнозирования в оперативной практике гидрометслужб проводилась в соответствии с наставлением по службе прогнозов (Наставление по службе прогнозов, 1962).

2.3. Методология использования гидравлической модели HEC-RAS

Для проведения настоящих исследований используется программный комплекс HEC-RAS 6.3.1, предназначенный для проведения гидравлических расчетов рек, а также расчетов режима стока наносов и расчетов гидрохимических параметров водных объектов (Brunner et al., 2016). В рамках данной работы применялась версия HEC-RAS 6.3.1, которую можно загрузить в открытом доступе в сети интернет (Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC), 2022). Работа в программе HEC-RAS осуществлялась в соответствии с пользовательским руководством, авторами статьи было использовано 1D-моделирование (HEC-RAS User's Manual, 1998).

Работа с программой HEC-RAS начинается с построения модели рассматриваемого участка реки и ввода базовой информации в используемый программный комплекс

HEC-RAS, затем следует ввод гидрологической информации и производится начальный расчет, после чего проводится оценка качества полученного по расчету результата. Моделирование с помощью HEC-RAS может имитировать изменчивость поперек и вдоль пути потока. Область модели дискретизируется на ячейки сетки, где каждая ячейка использует базовые данные рельефа с меньшей потерей разрешения (модель сетки). Это приводит к минимизации времени, необходимого для выполнения вычисления (Mihu-Pintilie et al., 2019). Для каждой ячейки и поверхности ячейки HEC-RAS создает подробную таблицу гидравлических свойств (например, соотношение высоты и объема, высоты и площади и т. д.). В результате создаются ячейки большего размера, которые могут сохранять детали рельефа и использовать более высокие временные интервалы.

Геометрические характеристики модели русла подготавливались в программе ArcGIS 10.5. В качестве топографической основы для вычисления створовых параметров применялись спутниковые снимки, находящиеся в открытом доступе, привязанные с помощью программы Google Earth Pro и обработанные в ArcGIS 10.5. Гидрометрические работы на реке были проведены по 2014 году - самому многоводному за весь период наблюдений. Для получения модели рельефа (Terrain) в процессе исследования нами использовалась глобальная цифровая модель высот Shuttle Radar Topography Mission (ЦМБ SRTM), с пространственным разрешением 30 м.

Классификация степени опасности наводнений проводилась в соответствии с результатами ранее проведенной работы для территории Казахстана (Ongdas et al., 2020). Согласно этой классификации, были определены критерии, указанные в таблице II.

Таблица II. Классификация опасности наводнений, разработанная для условий Казахстана

Уровень опасности	Глубина потока (maxdepth), м
Низкий	< 1
Средний	1-3
Высокий	3-5
Кризисный (экстремальный)	5-7
Катастрофический	> 7

2.4. Методология статистического анализа гидрологических и климатических изменений в речном бассейне

По всем исходным рядам для характеристики временной изменчивости были найдены оценки линейных трендов. Исходные ряды средних годовых температур и годовой суммы осадков были показаны в виде точек, соединенных линиями. Статистический анализ трендов изменения климатических параметров (температуры воздуха и осадков) и прогноз на будущие 10-20 лет (на 2030 и 2040 гг.) проводился в инструментах Excel (Подрезов, 2019).

С целью выявления цикличности в изменении среднегодовых расходов воды для всего исследуемого периода была построена разностно-интегральная кривая, которая дала представление о нарастающих суммах отклонений расходов воды от среднего многолетнего значения.

3. Результаты исследования

3.1. Климатические и гидрологические изменения в бассейне р. Жабай

Оценка линейных трендов за период с 1980 по 2017 г. показывает увеличение годовой суммы осадков и годовой температуры воздуха по всем метеостанциям (рис. 5, 6). Скорость роста годовой суммы осадков составила на большинстве метеостанций 11,4-21,1 мм/10 лет (на метеостанции Акколь - 6,9 мм/10 лет). Скорость роста среднегодовых температур воздуха составила 0,26-0,30 °С/10 лет (на метеостанции г. Атбасар - 0,52 °С/10).

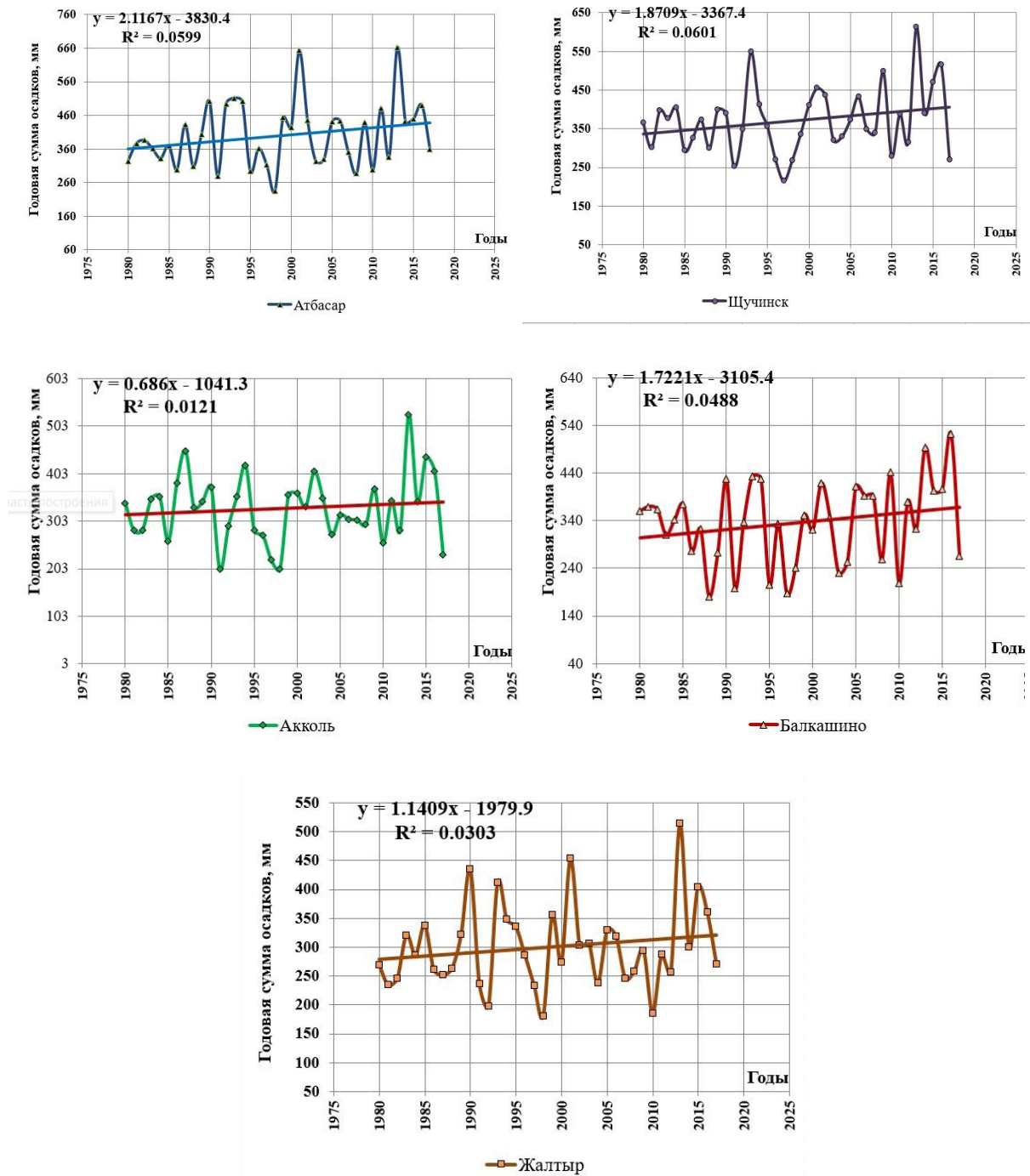


Рис. 5. Изменение годовой суммы осадков по метеостанциям в бассейне р. Жабай за период 1980-2017 гг.

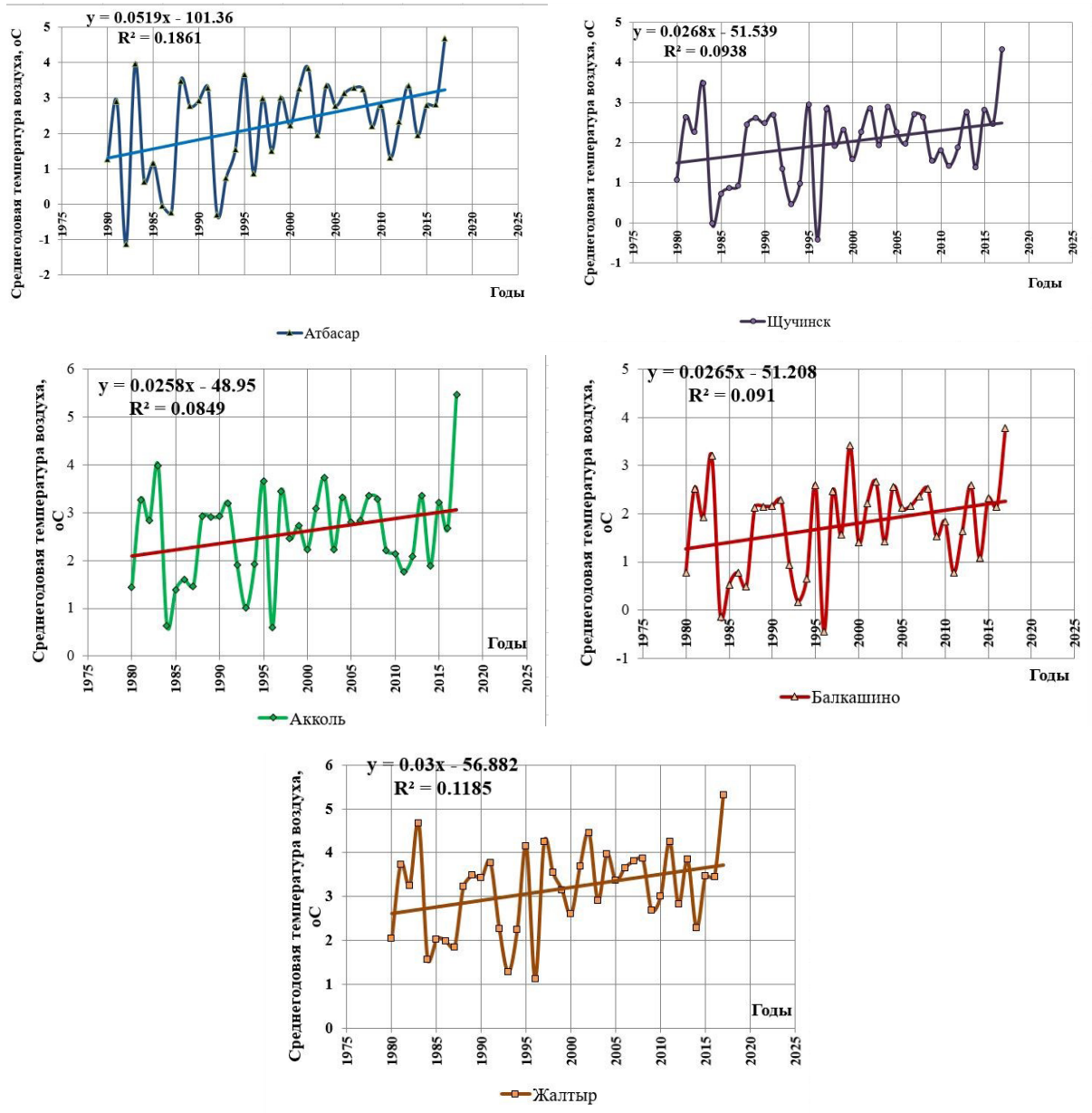


Рис. 6. Изменение среднегодовой температуры воздуха по метеостанциям в бассейне р. Жабай за период 1980-2017 гг.

Расчеты будущих изменений метеопараметров на 2030 и 2040 гг., произведенные с использованием уравнений регрессии, показывают, что годовая сумма осадков составит 107-122 % нормы, а температура воздуха повысится на 0,8-2,2 °С (таблицы III, IV).

Таблица III. Оценка суммы осадков на 2030 и 2040 гг. по бассейну р. Жабай

№ п/п	Название метеостанции	Среднемноголетняя сумма осадков, мм	Прогноз суммы осадков за годы			
			2030		2040	
			мм	в % от нормы	мм	в % от нормы
1	Атбасар	400	467	117	489	122
2	Щучинск	372	431	116	449	121
3	Акколь	330	351	107	358	109
4	Балкашино	336	390	116	408	121
5	Жалтыр	300	336	112	348	116

Таблица IV. Оценка температуры воздуха на 2030 и 2040 гг. по бассейну р. Жабай

№ п/п	Название метеостанции	Среднемноголетняя температура воздуха, оС	Прогноз температуры воздуха за годы			
			2030		2040	
			в оС	отклонения в оС	в оС	отклонения в оС
1	Атбасар	2,3	4,0	+1,7	4,5	+2,2
2	Щучинск	2,0	2,9	+0,9	3,1	+1,1
3	Акколь	2,6	3,4	+0,8	3,7	+1,1
4	Балкашино	1,8	2,6	+0,8	2,9	+1,1
5	Жалтыр	3,2	4,0	+0,8	4,3	+1,1

Анализ изменения среднегодовых расходов воды, проведенный с помощью оценки линейного тренда и разностно-интегральной кривой за период 1984-2017 гг. показывает, что в период с 1984 по 1994 г. межгодовой сток реки незначительно повышался, с 1995 по 2013 г. наблюдалось понижение, а с 2014 по 2017 г. - повышение стока (рис. 7, 8). В целом, линейный тренд меняется незначительно, но в 2007 и 2014 гг. наблюдались многоводные годы, когда максимальные расходы воды составили 1150 и 1750 м³/с, превысив среднее значение максимальных расходов воды за весь период наблюдения (355 м³/с) в 3,2 и 4,9 раз соответственно (рис. 9).

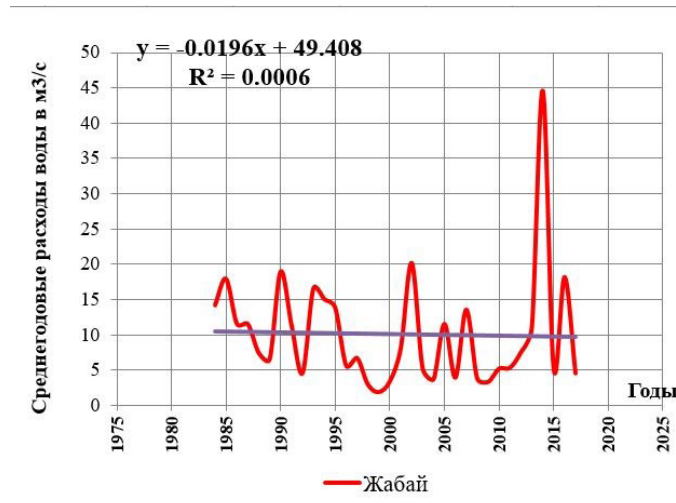


Рис. 7. Наблюдаемые среднегодовые расходы воды за период 1984-2017 гг.

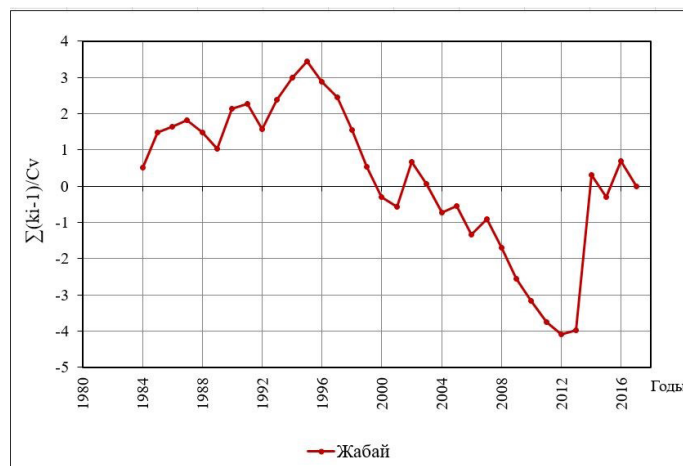


Рис. 8. Разностно-интегральная кривая среднегодовых расходов воды за 1984-2017 гг.

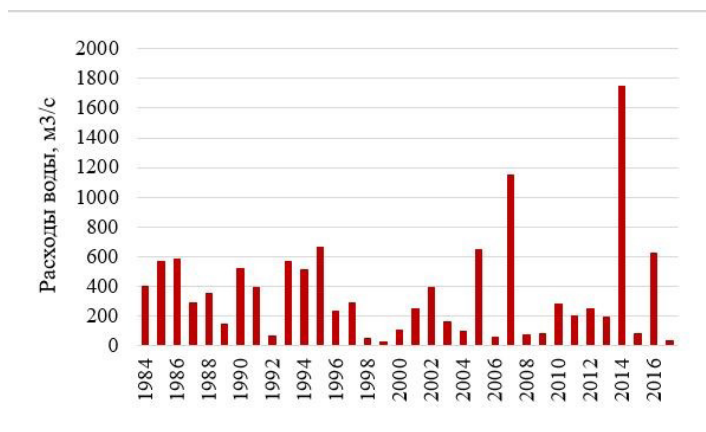


Рис. 9. Максимальные наблюдаемые расходы воды на р. Жабай - г. Атбасар

Оценка расходов воды на 2030 и 2040 гг. показывает небольшое уменьшение водности - 93-95 % нормы (таблица V).

Таблица V. Оценка расходов воды на 2030 и 2040 гг. по р. Жабай

№ п/п	Название реки - гидропоста	Средний расход воды за период наблюдений 1984-2017 гг. (норма), м³/с	Прогноз расхода воды за годы			
			2030		2040	
			м³/с	в % от нормы	м³/с	в % от нормы
1	р. Жабай - г. Жабай	10,1	9,62	95	9,42	93

3.2. Результаты краткосрочного прогноза водности р. Жабай на период паводка

Калибровка гидрологической модели SWIM для р. Жабай производилась на периоде 2000-2017 гг., что соответствует периоду стабильного повышения температуры воздуха в Казахстане. Значения параметров оптимизации модели представлены на рис. 10. Результаты оценки эффективности модели по критерию NSE (Нэша-Сатклиффа) составили 0,94, коэффициент корреляции $R^2 = 0,98$, что означает, что модель хорошо воспроизводит динамику моделируемого стока с наблюдаемым и может использоваться в оперативном гидрологическом прогнозировании, т. к. в соответствии с наставлением по службе прогнозов имеет качество методики «хорошее».

```

zhabay.bsn x
SWITCH PARAMETERS
0   isc           =0/1, SC: READ/CALC
1   icn           =0/1, CN: STANDARD / cnum1,cnum3 FOR ALL SOILS
0   idlef         =0/1, DAY LENGTH EFFECT IN CROP: WITHOUT/WITH
0   intercep      =0/1, INTERCEPTION: WITHOUT/WITH
0   iemeth        =0/1, EVAPORATION: Priestley-Taylor/Turc-Ivanov
0   idvwk         =0/1, EVAPORATION CALCULUS: DVWK-Merkblatt 238
0   res_switch    =0/1, reservoir module off/on
0   res_switch    =0/1, reservoir module off/on
0   subcatCh      =0/1, subcatchment calibraton module off/on

BASIN, INITIALIZATION & CALIBRATION PARAMETERS
da      bff
8530    .027527
cnum1   cnum2     cnum3
45.0    70.0      93.00
ecal    thc
1.028645 .962434
gwq0    abf0      gwDelayDays
0.2     0.1       3.0166116
ekc0    prf       spcon      spexp
1.0     1.000    0.0001   1.000
snow1   storc1    stinco
0.       0.5      0.55
chwc0   chxk0     chcc0    man
1        1.0      0.1      1.0
roci    roc2     roc3     roc4
0.       1.475398  0.       2.525705
sccor   prcor    rdcor    fccor
0.5     1.0      1.0      1
retNsur retNsub    retNgrw  retPsur
5.       365     15000   20.
degNsur  degNsub    degNgrw  degPsur
0.02    0.3      0.3     0.02
tsnfall  tmelt     smrate   gmrate
1.0     -3.0     0.148764238  0.3
xgrad   tgrad    ulmax0   rnew    raalf    precipaiton and temperatur
.00124584 -.0050141 1.0     0.08   0.0
maxUp
7

CO2 EFFECT ON NET PHOTOSYNTHESIS (alpha) & TRANSPIRATION (beta)
(ialpha,ibeta) = (1,0) OR (1,1) ONLY FOR SCENARIO PERIODS!
ialpha  ibeta    C3C4crop CO2-ref  CO2-scen

```

На рис. 11 представлены осредненный смоделированный и фактический гидрографы стока р. Жабай за период калибровки 2000-2017 гг.

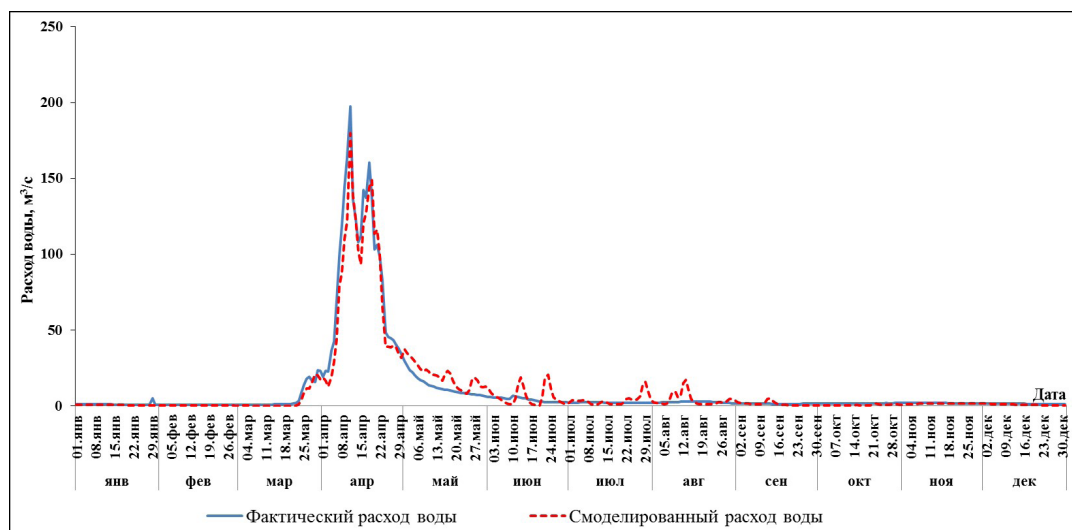


Рис. 11. Сравнение осредненных гидрографов наблюдаемого и смоделированного стока р. Жабай - г. Атбасар за период калибровки 2000-2017 гг.

В качестве проверочных лет для оценки применения гидрологической модели SWIM были выбраны 2019 и 2020 гг.

Калибровочные параметры для реки настроены главным образом на изменение синоптических данных (параметры температуры таяния снега, пороговая температура перехода жидких осадков в твердые и т. п.), которые определены для водосбора реки до десятых (0,1) долей. Во время половодья/паводков 2019 и 2020 гг. синоптические прогнозные данные предоставлялись Гидрометцентром РГП «Казгидромет». При хорошей оправдываемости метеопрогнозов (по методике Гидрометцентра) для моделирования были выявлены значительные расхождения при сопоставлении прогнозных и фактических данных на 2019 и 2020 гг. На рис. 12, 13 приведены сравнительные графики прогнозных и фактических данных для метеостанции Балкашино, расположенной в верховьях р. Жабай.

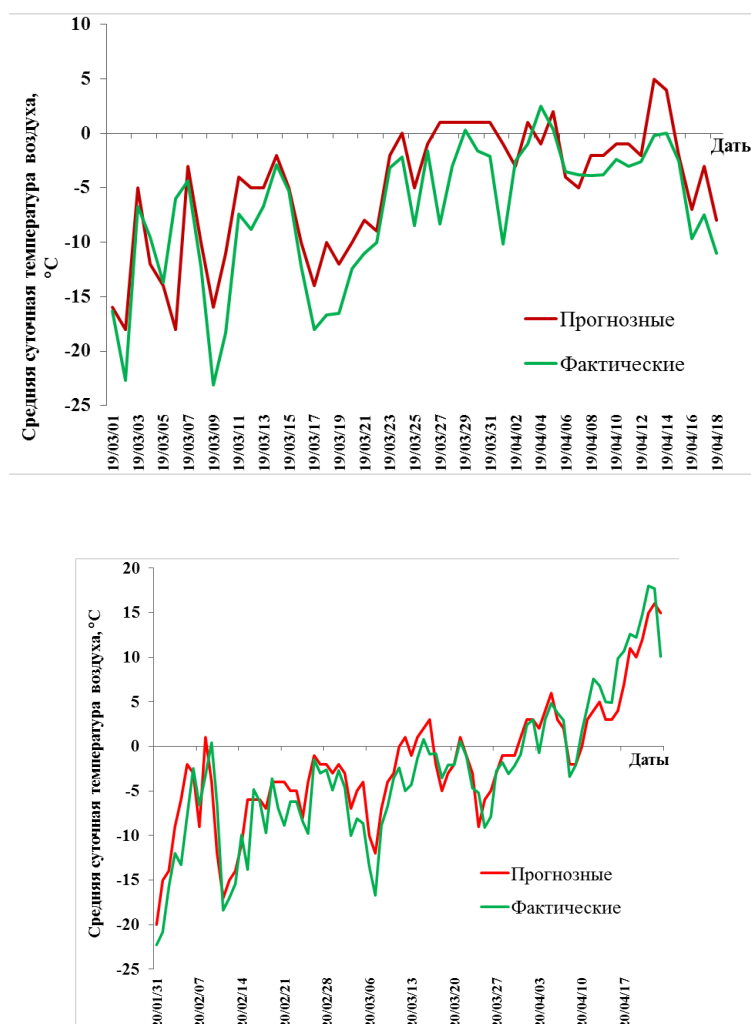


Рис. 12. Спрогнозированные и наблюдаемые значения средней суточной температуры воздуха для метеостанции Балкашино на период паводка февраль (март)-апрель 2019 и 2020 гг.

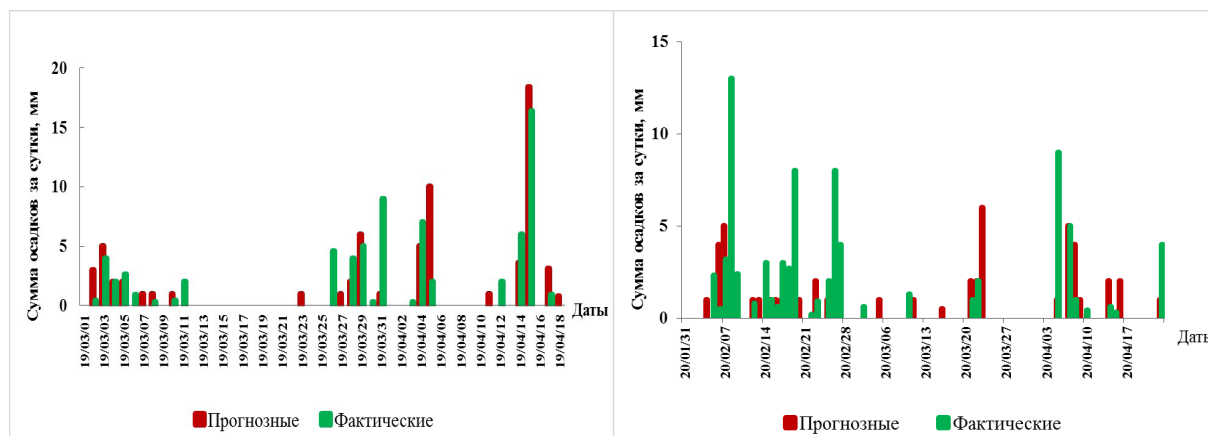


Рис. 13. Спрогнозированные и наблюдаемые значения суммы осадков за сутки для метеостанции Балкашино на период паводка февраль (март)-апрель 2019 и 2020 гг.

Ошибка, рассчитанная между фактическими и спрогнозированными значениями метеопараметров, составила 10-15 %, что также влияет на качество прогнозов водности реки в период паводка.

Моделирование гидрографа стока с заблаговременностью 3-7 суток производилось с использованием фактической метеоинформации (минимальная, максимальная и средняя температура воздуха, сумма осадков, средняя скорость ветра) за предшествующий период и прогностической метеоинформации на ближайшие 7 дней. Значения относительной влажности воздуха и суммарной солнечной радиации использовались за прошедшие годы по приближенному году-аналогу.

На рис. 14 представлен смоделированный и фактический гидрографы стока р. Жабай за 2020 г.

В таблице VI размещены данные об оправдываемости выпущенных прогнозов водности; средняя оправдываемость за период паводка составила для 2019 г. 81 %, для 2020 г. - 86 %.

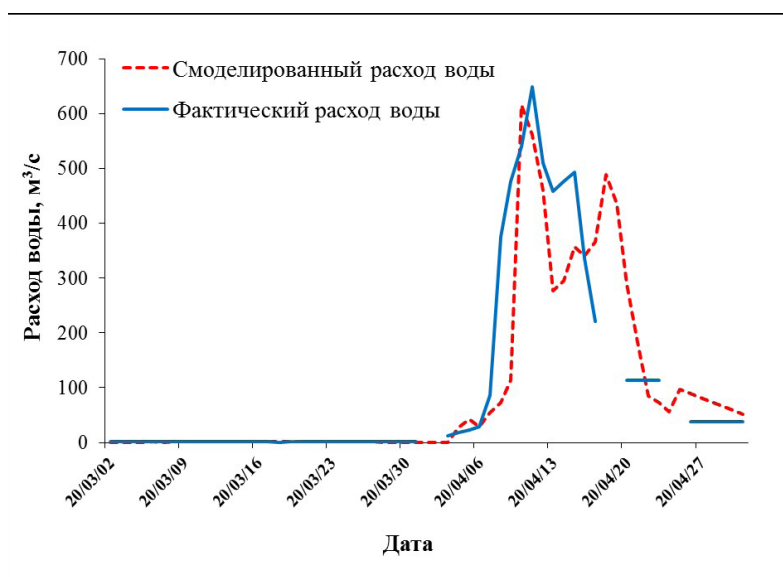


Рис. 14. Сравнение гидрографов наблюдаемого и смоделированного стока р. Жабай - г. Атбасар на 2020 г.

Таблица VI. Сравнение прогнозных и фактических объемов стока р. Жабай за период паводка февраль (март)-апрель 2019 и 2020 гг.

Даты	Спрогнозированный объем стока, млн. м ³	Наблюденный объем стока, млн. м ³	Оправдываемость, %
2019 год			
2 - 8 марта	0.54-0.79	0.60	100
9 - 15 марта	0.54-0.79	0.69	100
16 - 22 марта	0.52-0.76	0.60	100
23 - 29 марта	2.58-3.84	1.21	51
30 марта - 5 апреля	15.86-23.79	115.52	21
6 - 12 апреля	178.99-268.47	428.8	63
Общая оправдываемость, %			81
2020 год			
1 - 7 февраля	0.43-0.65	0.62	100
8 - 14 февраля	0.25-0.38	0.42	90
15 - 21 февраля	0.26-0.40	0.38	100
22 - 28 февраля	0.28-0.42	0.42	100

29 февраля - 6 марта	0.30-0.47	0.49	96
7 - 13 марта	0.42-0.62	0.5	100
14 - 20 марта	0.43-0.64	0.64	100
21 - 27 марта	0.61-0.91	1	91
28 марта - 3 апреля	0.90-1.40	3.26	35
4 - 10 апреля	60.3-90.5	131	69
11 - 17 апреля	208.3-250.5	261	96
18 - 24 апреля	116.0-174.0	84.8	73
25 апреля - 1 мая	36.2-54.3	23	64
Общая оправдываемость, %			85.7

Гидрологическое моделирование в SWIM позволяет учитывать сложный водный баланс в бассейне р. Жабай. Помимо поверхностного стока, в период паводка в ее бассейне поднимется и уровень грунтовых вод. Также соседний бассейн р. Калкутан имеет сложный подземный водообмен с р. Жабай, что становится причиной более резкого поднятия уровня и расхода воды. Эти соседние реки имеют сезонную и многолетнюю неравномерность стока и относятся к рекам со сложным водным балансом, с основными составляющими - подземным водообменом со смежными бассейнами, аккумуляцией воды в бессточных понижениях, особенностями процесса снеготаяния и «дружности» весны.

3.3. Результаты картирования площади подтопления в бассейне р. Жабай

Определение степени опасности наводнения в период паводков для территории бассейна р. Жабай было проведено с помощью программы HEC-RAS 6.3.1. Для расчетов с применением в программе HEC-RAS использовался 2014 г. с наибольшим расходом воды в период паводка - 1750 м³/с, приближенный к паводку редкой вероятности превышения (1 % обеспеченности). Результаты картирования опасности наводнения представлены на рис. 15.

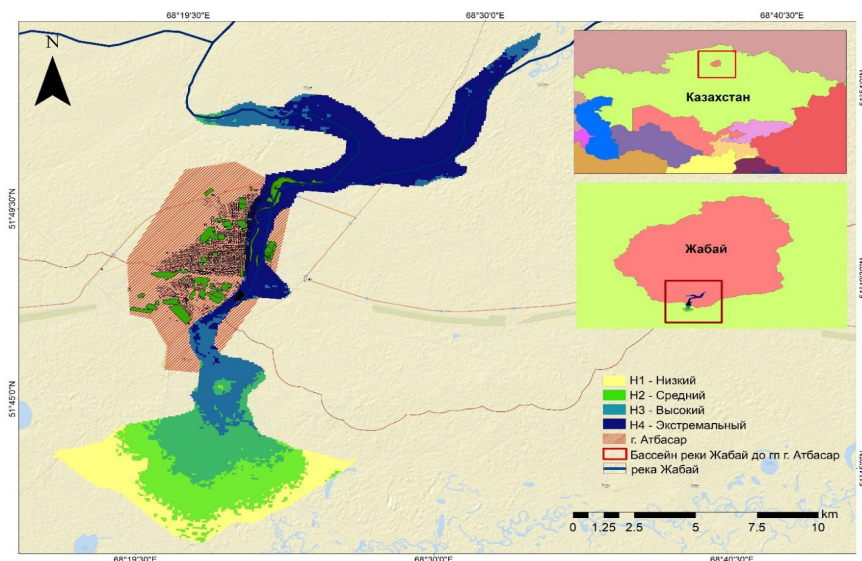


Рис. 15. Карта подтопления (наводнения) бассейна р. Жабай и г. Атбасар в период паводка

Используя классификацию опасностей, составленную для территории Казахстана (Ongdas et al., 2020), авторы проанализировали степень опасности наводнения для территории речного бассейна Жабай. Результаты расчетов территории подтопления показали, что наибольшая опасность, со степенью угрозы кризисный (экстремальный), с глубиной 5-7 м, была в восточной части г. Атбасар, находящегося на правом берегу в устье р. Жабай. В южной части города степень опасности высокая, с глубиной 3-5 м, и ниже по течению, степень опасности понижается до средней, 1-3 м, и низкой - менее 1 м. Эти расчеты также подтверждает измеренный в 2017 г. уровень воды 6,1 м, когда произошел размыв дамбы и затопление г. Атбасар.

Расчеты глубины затопления, произведенные в программе HEC-RAS, можно использовать при расчете характеристик строительства защитных сооружений от наводнений и паводков (противопаводковых дамб).

4. Заключение

Анализ климатических изменений в бассейне р. Жабай показывает скорость роста температур воздуха 0,26-0,52 °C/10 лет, осадков - 6,9-21,1 мм/10 лет. При сохранении текущих тенденций в линейных трендах ожидается, что к 2030 и 2040 гг. температура воздуха повысится на 0,8-2,2° C, а осадки возрастут на 7-22 % от среднемноголетних значений.

Этот факт говорит об увеличении продолжительности теплого периода, увеличении количества осадков и усилении интенсивности снеготаяния, а значит,

и повторяемости многоводных лет. Многоводные 2007 и 2014 годы, а также наводнение 2017 г. подтверждают такую тенденцию, в связи с чем опасность наводнений и затоплений г. Атбасар резко возрастает.

Оценка эффективности применения гидрологического моделирования SWIM позволяет определить «хорошее» качество методики. Качество выпущенных прогнозов водности на 2019-2020 гг. показало их оправдываемость в период паводка - 81-86 %.

В ходе исследовательских работ адаптация гидрологической модели SWIM была улучшена и может применяться в оперативной практике для составления краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов расхода и объема воды р. Жабай.

Определение степени опасности наводнения показало наибольшую опасность, как кризисную или экстремальную для восточной части г. Атбасар, находящегося в устье реки вблизи ее русла, и высокую - для южной части г. Атбасар.

На примере р. Жабай и расположенных в ее пойме существующих и проектируемых гидротехнических сооружений (противопаводковых дамб) и жилых объектов показано, какие объекты попадают в наиболее уязвимую расчетную зону затопления при паводке редкой вероятности превышения (1 % обеспеченности).

Данное исследование предназначено для лиц, принимающих решения по рациональному использованию и перспективному планированию водных ресурсов в условиях изменения климата, а также для водохозяйственных и коммунально-бытовых служб и органов управления, сил и средств МЧС Казахстана для принятия превентивных мер по защите населения, инженерной защиты территории и строительству противопаводковых сооружений.

Список литературы

- Бекетова, А. (2023). Некачественное расследование не спасет от паводков. Информ. портал 716.kz (27 апреля 2023 г.). <https://716.kz/news/7056-vesna-blizko-nekachestvennoe-rassledovanie-ne-spaset-ot-pavodkov.html>
- Дюсекеева, Д. (2022). В зоне подтопления более 500 домов: Атбасар готовится к паводку. *Aqmola News* (16 марта 2022 г.). <https://aqmolanews.kz/ru/2022/03/16/v-zone-podtopleniya-bolee-500-domov-atbasar-gotovitsya-k-pavodku-video/>
- Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2016 г. (2017). НИЦ РГП «Казгидромет», Астана.
- Косенов, А. (2014). Талые воды подтопили 330 домов в Атбасаре. *Tengrinews.kz* (11 апреля 2014 г.). <https://tengrinews.kz/events/talyie-vodyi-podtopili-330-domov-v-atbasare-253448/>
- Наставление по службе прогнозов (1962). Выпуск 3, часть 1. Л.: Гидрометеоиздат.
- Подрезов, О.А. (2019). Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических данных. Бишкек: Изд-во КРСУ.
- Руководство по гидрологической практике (2012). Т II, гл. 7, разд. 7.1, II-7-1. Женева: издание ВМО.

- Садвакасов, Д. (2021). Снег как ежегодная климатическая угроза. *Аналитический интернет-журнал Власть* (14 мая 2021 г.). <https://vlast.kz/regiony/44981-sneg-kak-ezegodnaa-klimaticeskaa-ugroza.html>
- Brunner, G.W., Warner, J.C., Wolfe, B.C., Piper, S.S., & Marston, L. (2016). HEC-RAS, River Analysis System Applications Guide. US Army Corps of Engineers, *Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023). <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/>
- GlobeLand30: Publicly available Global Geo-information Product (2023). <http://www.globeland30.org/GLC30Download/index.aspx>; https://landcover.usgs.gov/global_climatology.php.
- GRASS4.1 Reference Manual (1993). US Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratories, Champaign, Illinois.
- GRASS GIS. Система поддержки анализа географических ресурсов (2023). <https://grass.osgeo.org/grass41/grass4.1/>
- HEC-RAS User`s Manual (1998). *HEC-RAS Documentation* (army.mil)
- Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC) (2022). <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/download.aspx>
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.I., Becker, A. (1996). Integrated Modelling of Hydrology and Water Quality in Mesoscale Watersheds. PIK Report, № 18, июль 1996. *Germany: Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)*, 32 p.
- Mihu-Pintilie, A.; Cimpianu, C.I.; Stoleriu, C.C.; Pérez, M.N.; Paveluc, L.E. (2019). Using High-Density LiDAR Data and 2D Streamflow Hydraulic Modeling to Improve Urban Flood Hazard Maps: A HEC-RAS Multi-Scenario Approach. *Water*, 11(9), 1832. <https://doi.org/10.3390/w11091832>
- Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A, Zinabdin, N. (2020). Application of HEC-RAS (2D) for Flood Hazard Maps Generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. *Water*, 12(10), 2672. <https://doi.org/10.3390/w12102672>

FLOOD AND FLASH FLOOD RISK ASSESSMENT FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE ZHABAY RIVER BASIN (KAZAKHSTAN)

Kalashnikova O. Yu., ^a , Nurbacina A.A. ^b , Niyazov J.B. ^c 

^a Central Asian Institute of Applied Geosciences, 73/2 Timur Frunze St., Bishkek, 720027, Kyrgyz Republic

^b Institute of Geography and Water Safety, Committee of Science, Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, 99 Pushkina str., Almaty, 050010, Republic of Kazakhstan

^c Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, 14a Ayni Str., Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan

Corresponding author: o.kalashnikova@caiag.kg

<https://doi.org/10.29258/CAJSCR/2023-R1.v2-1/22-45.rus>

ABSTRACT

The investigation of climate and hydrological changes, encompassing the assessment of flood hazard, as well as flood prevention and forecasting capacities, took place in the Zhabay River Basin. Since 2000, Kazakhstan has been witnessing stable air temperature increase. In the target watershed, strong floods (2014) and destructive waves (2017) - threatening the lives of the residents of the town of Atbasar located at the river mouth - were registered during the same period. The HEC-RAS hydraulic modeling software applied during the research demonstrated the extreme (crisis) risk for the most eastern and high risk for the southern town sections. The climate change forecast for 2030 and 2040 based on long-term means, compiled using regression equations, showed further air temperature growth by 0.8-2.2°C and precipitation growth by 7-22% in the Zhabay Basin. It means that in the future, warm period duration, snow melting intensity, and precipitation amount will likewise increase. The article presents the outcomes of analyzing the short-term hydrological forecasts compiled using the Soil and Water Integrated Model (SWIM). The analysis results show 81-86% accuracy of flood forecasts based on independent validation years (2019 and 2020), indicating that the model can be used for operational purposes, i.e. generating short-term water flow and volume forecasts. The parameter optimization presented also allows applying the model for mid-, long- and super long-term discharge forecasts for the Zhabay River. The study results may guide decision-makers in terms of long-term water resource planning in the context of climate change, as well as water managers, utility operators, and emergency services in designing public prevention measures, constructing flood control and other engineering installations.

ARTICLE HISTORY

Received: April 28, 2023

Accepted: May 4, 2023

Published: June 2, 2023

KEYWORDS

climate change, water resources, short-term forecasting, hydrological modeling, hydraulic modeling, SWIM, HEC-RAS, Zhabay River, Kazakhstan, Central Asia.

References

- Annual Bulletin on Monitoring the State and Climate Change of Kazakhstan: 2016 (2017). [Ezhegodnyi byulleten monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimata Kazakh-stana: 2016]. RSE "NITS RGP Kazhydromet" Research and Production Center, Astana. [in Russian]
- Beketova, A. (2023). Poor investigation won't save from floods [Nekachestvennoe rassledovanie ne spaset ot pavodkov]. 716.kz Online News Service (available at: <https://716.kz/news/7056-vesna-blizko-nekachestvennoe-rassledovanie-ne-spaset-ot-pavodkov.html>) [in Russian]
- Brunner, G.W., Warner, J.C., Wolfe, B.C., Piper, S.S. and Marston, L. (2016). HEC-RAS, River Analysis System Applications Guide. US Army Corps of Engineers, *Hydrologic Engineering Center*: Davis, CA, USA
- Dyusekeyeva, D. (2022). Over 500 homes in the flood zone: Atbasar prepares for flood-ing [V zone podtopleniya bolee 500 domov: atbasar gotovitsya k pavodku] Aqmola News Online News Service (available at: <https://aqmolanews.kz/en/2022/03/16/in-the-flood-zone-more-than-500-houses-atbasar-is-preparing-for-floods-video>) [in Russian]
- FAO of the United Nations (2023). (available at: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/>)
- Globeland30 (2023). (available at: <http://www.globeland30.org/GLC30Download/index.aspx>, https://landcover.usgs.gov/global_climatology.php)
- GRASS4.1 Reference Manual (1993). US Army Corps of Engineers. Construction Engineering Research Laboratories, Champaign, Illinois
- Guide for Hydrological Practice (2012). Vol. II, Ch. 7, Sec. 7.1. (7.1.1.) Subject Coverage. WMO Publication, Geneva, 2012, p. II-7-1
- Forecasting Service Guided Tutorial [Nastavlenie po sluzhbe prognozov]. Sec. 3(1)., Gidrometeoizdat, Leningrad, 1962, p. 196 [in Russian]
- HEC-RAS User`s Manual (1998). *HEC-RAS Documentation* (available at: army.mil)
- Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC) (2022). (available at: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>)
- Kosenov, A. (2014). 330 homes flooded by melt water in Atbasar [Talye vody podtopili 330 domov v Atbasare]. *Tengrinews.kz Online News Service* (available at: <https://tengrinews.kz/events/talye-vodyi-podtopili-330-domov-v-atbasare-253448/>) [in Russian]
- Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.I., Becker, A. (1996). Integrated Modelling of Hydrology and Water Quality in mesoscale watersheds. Report No.18, July 1996, *Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)*, Germany, 32 p.
- Mihu-Pintilie, A., Cîmpianu, C.I., Stoleriu, C.C., Pérez, M.N., Paveluc, L.E. (2019). Using high-density LiDAR data and 2D streamflow hydraulic modeling to improve urban flood hazard maps: A HEC-RAS multi-scenario approach. *Water* 2019, 11(9), 1832 (available at: <https://doi.org/10.3390/w11091832>)
- Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., Zinabdin, N. (2020). Application of HEC-RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) river in Kazakhstan. *Water* 2020, 12(10), 2672 (available at: <https://doi.org/10.3390/w12102672>)
- Podrezov, O.A. (2019). Methods of statistical processing and analysis of hydrometeorological observations: textbook for bachelor hydrometeorologists [Metody statisticheskoy obrabotki i analiza gidrometeorologicheskikh nabljudenij: uchebnik dlja bakalavrov-gidrometeorologov]. Bishkek: KRSU, p. 170 [in Russian]
- Sadvakasov, D. (2021). Snow as an annual climate threat [Sneg kak ezhegodnaya klimaticheskaya ugroza]. *Vlast.kz. Online News Service* (available at: <https://vlast.kz/regiony/44981-sneg-kak-ezhegodnaa-klimaticheskaya-ugroza.html>) [in Russian]