



# Научные записки НИЦ МКВК

№26

2024

Л.В. Сычугова, И.И. Рузиев, А.Г. Сорокин

## Прогноз водности рек Заравшан, Вахш и Нарын на вегетационный период с использованием программы MODSNOW



**Научно-информационный центр  
Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии  
Центральной Азии**

**Л.В. Сычугова, И.И. Рузиев, А.Г. Сорокин**

**Прогноз водности рек  
Заравшан, Вахш и Нарын  
на вегетационный период  
с использованием  
программы MODSNOW**

**Ташкент 2024**

## **Аннотация**

Рассматриваются результаты прогнозирования водности рек Заравшан (гидроузел Раватхуджа), Вахш (приток к Нурекскому водохранилищу) и Нарын (приток к Токтогульскому водохранилищу) на вегетационный период 2022 г. (р. Заравшан) и 2024 г., выполненные с использованием специализированного программного обеспечения MODSNOW. Прогноз для р. Заравшан проводился на вегетационный период за 2022 г. в створе Раватхуджа т.к. в базе НИЦ МКВК данные о расходах воды в этом створе имеются до июня 2023 г., а в створе Дупули – до 2000 г. Программа MODSNOW базируется на использовании спутниковых снимков MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). MODSNOW моделирует гидрологический цикл в бассейнах рек с использованием метеорологических данных, данных о расходе воды и данных о состоянии снежного покрова. В результате прогнозирования водности рек на вегетационный период в MODSNOW были построены линейные уравнения, которые отражают зависимости между различными параметрами гидрологического цикла. Проведено сравнение между прогнозными значениями, полученные в MODSNOW с прогнозными значениями, полученные по фактическим данным.

**Ключевые слова:** MODSNOW, MODIS, прогноз водности, вегетационный период, снежный покров, линейные уравнения.

## **Введение**

Для прогнозирования водности в реках в НИЦ МКВК используется алгоритм поиска водности по годам-аналогам. Суть метода заключается в выборке стока 2-х леток, наблюдаемых в прошлом в наибольшем приближении к текущей ситуации. Годы-аналоги, выбираются из имеющихся в НИЦ МКВК ретроспективных данных. Водность рек, прошлых лет (продолжение года аналога) проектируется (как ожидаемые сценарии) на перспективу. Данный инструмент используется для подготовки аналитических записок по прогнозированию стока рек бассейнов Сырдарья и Амударья на предстоящий сезон. Планируется методику данных расчетов усовершенствовать, добавив к ней фактор снежного покрова зоны формирования стока.

Прогнозирование водности рек на вегетационный период является ключевой задачей для обеспечения рационального использования водных ресурсов в сельском хозяйстве, энергетике и других отраслях экономики. Вегетационный период характеризуется высоким спросом на воду, что де-

лает необходимым точное планирование ее использование. Программа MODSNOW, основанная на спутниковых снимках MODIS, а также на метеорологических и гидрологических данных, представляет мощный инструмент для прогнозирования водности.

В НИЦ МКВК установлена программа MODSNOW Ver. II, которая позволяет выполнять мониторинг снежного покрова в зоне формирования стока рек. В связи с развитием спутниковой информации, в настоящее время ведутся работы по созданию различных методов для прогноза стока рек на основе информации о снежном покрове полученных по спутниковым снимкам. В работе [1] проведен анализ с использованием спутниковых снимков MODIS для гидрологического прогнозирования для р. Нарын на основе индекса снежного покрова. Наилучшие результаты были получены в период снеготаяния (июнь-сентябрь), коэффициент корреляции составил (R) 0,70-0,80.

С появлением программы MODSNOW, которая в автоматическом режиме производит расчеты площади снежного покрова для различных речных бассейнов, появилась возможность получать данные о динамике снежного покрова ежедневно [2]. В работе [3] показаны результаты применения программы MODSNOW для определения пространственной характеристики запасов сезонного снежного покрова в высокогорных бассейнах рек Варзоб и Тар. В результате были разработаны прогностические уравнения, которые имеют практическое значение для составления своевременных и качественных прогнозов водности рек на декады.

Целью исследования является составление гидрологического прогноза на вегетационный период 2024г. стока рек Заравшан, Вахш и Нарын.

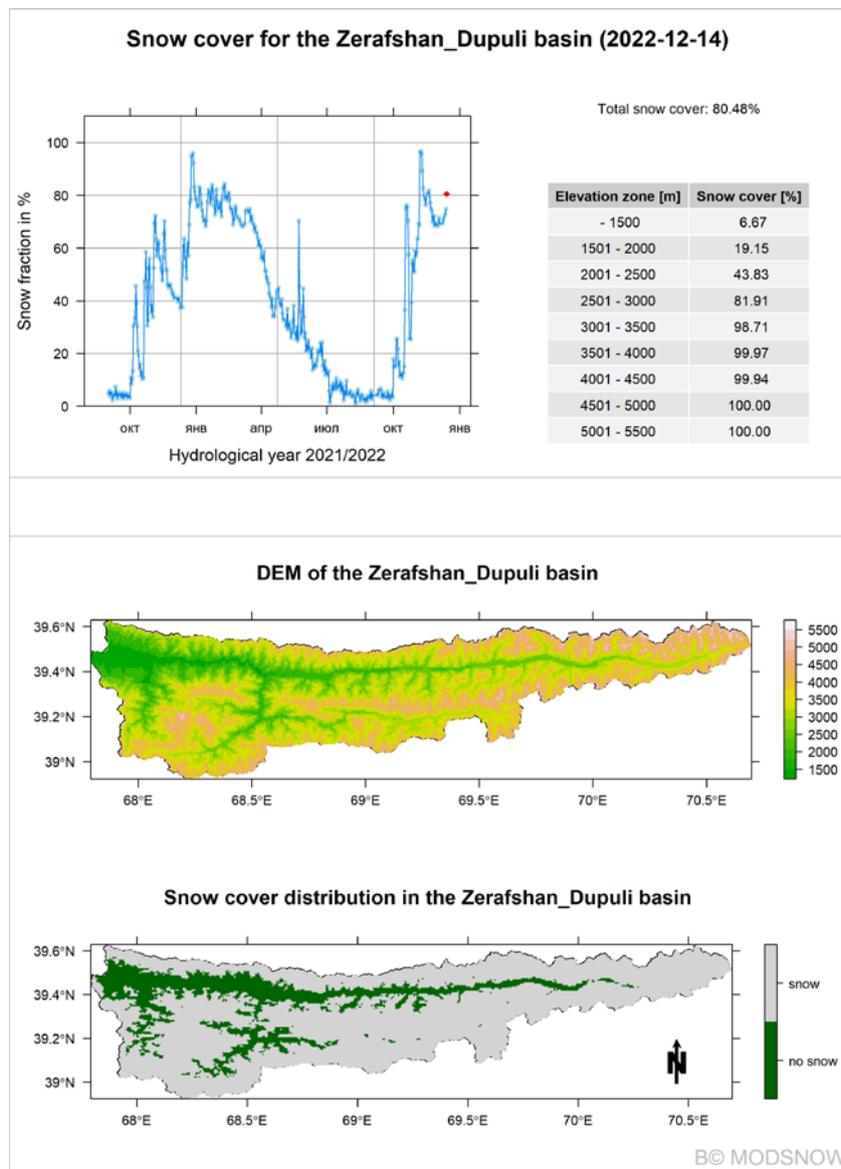
## **Области исследования**

### ***Река Заравшан***

Заравшан (в верховьях — Матча) река в Узбекистане и Таджикистане — длина 877 км., площадь бассейна 17,7 тыс.км<sup>2</sup>. Средний расход воды 162 м<sup>3</sup>/с. Берет начало с Зеравшанского ледника в горном узле между Туркестанским и Зеравшанским хребтами. Реку питают в основном ледники и снега. Поэтому наибольший сток в ней приходится на лето (июль, август), в холодный период года Зеравшан несет мало воды. В пределах Таджикистана Зеравшан принимает три больших притока — Фандарью, Кштутдарью и Магиандарью, стекающих с Гиссарского хребта, и более 100 мелких. Близ Самарканда русло Зеравшана разделяется на два рукава — Акдарью и Карадарью [4].

Гидрологический прогноз на вегетационный период 2022 г. в реке Заравшан проводился по зоне формирования стока до створа Дупули, а данные по реке были взяты по гидроузлу Раватхуджа.

На рис. 1 представлен ежедневный отчет о состоянии снежного покрова в бассейне реки Заравшан. Ежедневный отчет программы MODSNOW по состоянию на 14 декабря 2022 г. показал, что площадь поверхности, покрытой снегом, составляла 80,48% от общей территории наблюдаемого региона. Этот показатель являлся максимальным значением за 2022 год.



**Рис. 1. Ежедневный отчет о состоянии снежного покрова в бассейне реки Заравшан на 14 декабря 2022 г.**

### ***Река Вахш***

Река Вахш является основной рекой Таджикистана, которая сливаясь с рекой Пяндж, формирует трансграничную реку Амударья. Река Вахш образуется слиянием рек Сурхоб и Обихингоу, где водосборная площадь расположена в самых высоких отметках Центральной Азии в Памиро – Алайских горных хребтах и равна 39100 км<sup>2</sup>, длина 690 км, питание ледниково-снеговое.

Гидрологический прогноз на вегетационный период 2024 г. в реке Вахш проводился по приток к Нурекскому водохранилищу.

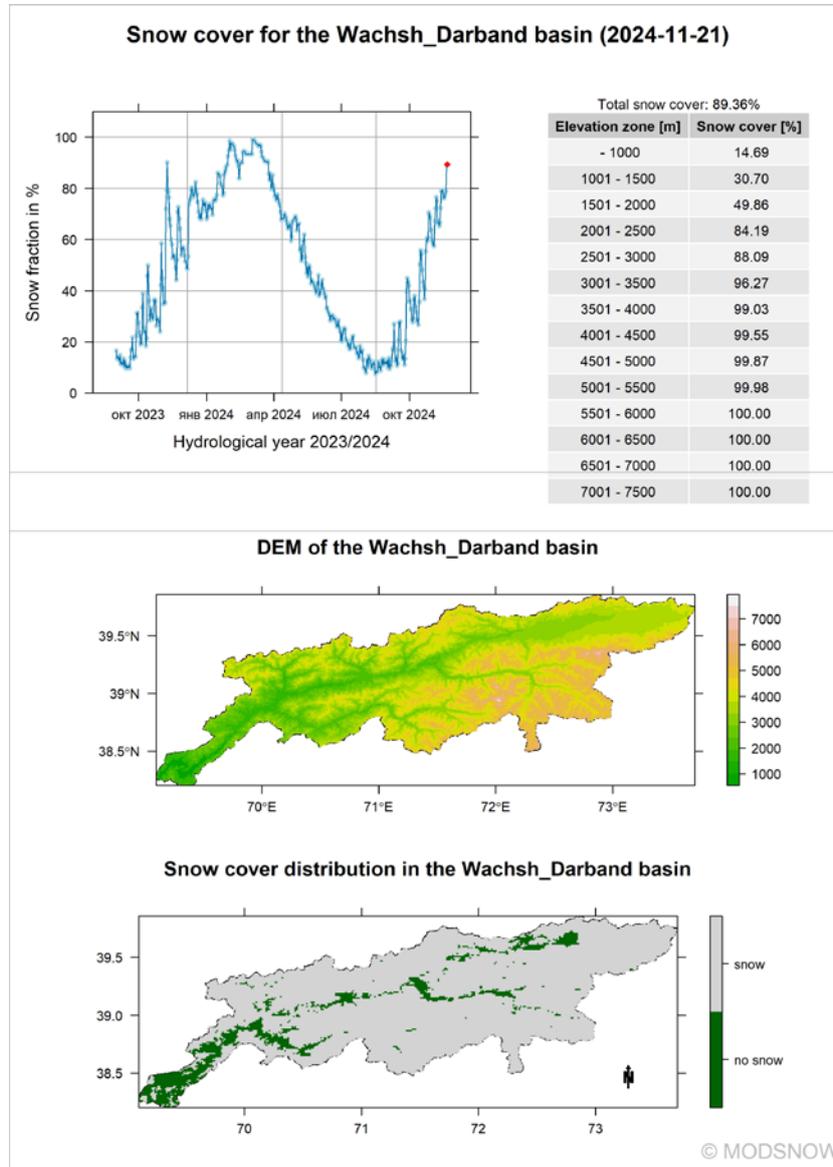
На рис. 2 представлен ежедневный отчет о состоянии снежного покрова в бассейне реки Вахш. Ежедневный отчет по состоянию на 21 ноября 2024 г. показал, что площадь поверхности, покрытой снегом в бассейне реки Вахш, составила 89,36%, что стало максимальным значением за 2024 год.

### ***Река Нарын***

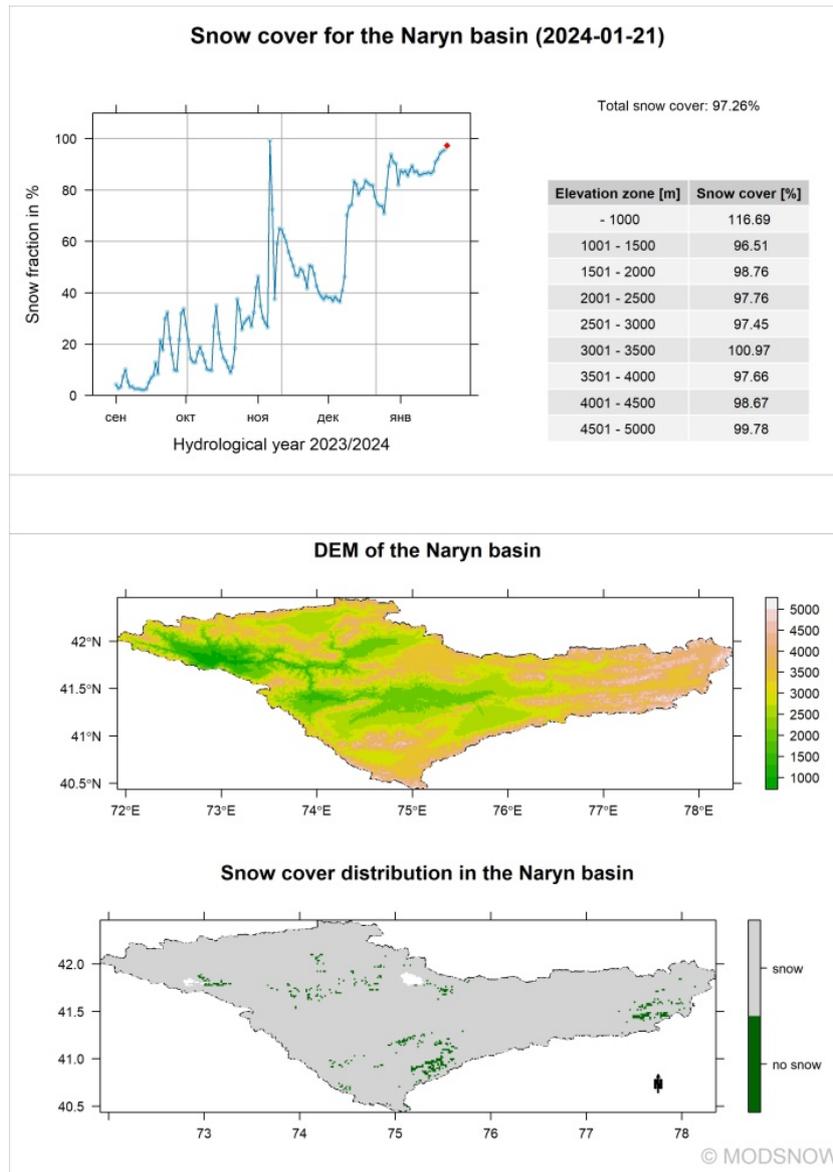
Река Нарын является крупнейшим притоком реки Сырдарья. Длина 807 км, площадь бассейна 59,1 тыс.км<sup>2</sup>. Средний расход воды 429 м<sup>3</sup>/сек. Нарын — образуется от слияния Большого и Малого Нарына, берущих начало во Внутреннем Тянь-Шане. Главная составляющая Большого Нарына — река Кум-Тор — вытекает из ледника Петрова (массив Акшийрак), спускающегося до 3786 м над уровнем моря и представляющего собой мощный ледяной поток длиной до 16,8 км. Река Бурхан – главная составляющая Малого Нарына — образуется из многочисленных речек, вытекающих из ледников северного склона хребта Джетимбель. Расход воды у слияния Большого и Малого Нарына равен 90 м<sup>3</sup>/сек. В верхнем течении Нарын относится к рекам ледниково-снегового питания с характерным для этого типа высоким летним стоком. Ниже по течению, в связи со снижением высоты водосбора и изменением условий питания, внутригодовое распределение стока постепенно меняется [4].

Гидрологический прогноз на вегетационный период 2024 г. в реке Нарын проводился по притоку к Токтогульскому водохранилищу.

На рис. 3 представлен ежедневный отчет о состоянии снежного покрова в бассейне реки Нарын. Ежедневный отчет по состоянию на 21 января 2024 г. показал, что площадь поверхности, покрытой снегом в бассейне реки Нарын, составила 97,26%, что стало максимальным значением за 2024 год.



**Рис. 2. Ежедневный отчет о состоянии снежного покрова в бассейне реки Вахш на 21 ноября 2024 г.**



**Рис. 3. Ежедневный отчет о состоянии снежного покрова в бассейне реки Нарын на 21 января 2024 г.**

### Метод исследования

Метод прогнозирования водности рек в программе MODSNOW основывается на интеграции спутниковых данных, метеорологических наблюдений и гидрологических моделей для оценки текущего состояния снежного покрова и прогнозирования его влияния на водность рек. Этот подход позволяет моделировать гидрологический цикл и прогнозировать объемы стока с учетом пространственно-временной изменчивости снежного покрова.

Спутниковые снимки MODIS используются для определения площади снежного покрова, динамики изменений снежного покрова во времени, а также для расчета объема воды, который может быть получен из снежного запаса. Программа MODSNOW предоставляет безоблачные карты снежного покрова и ежедневный отчет, который включает пространственно-временную статистику снега по отдельным бассейнам рек.

Карты строятся на основе ежедневных данных снежного покрова снимков MODIS с пространственным разрешением 500 м. Обработка в программе MODSNOW состоит из 7 этапов: загрузка доступных данных MODIS с сервера NSIDC (National Snow and Ice Data Center); загрузка данных о радиации со станций CAWa; оценка снежного покрова с использованием данных о радиации; преобразование исходных файлов HDF в формат GeoTIF; преобразование файлов GeoTIF в формат ASCII, включая маскирование бассейна; удаление облаков; постобработка статистики по картам снега [2].

В выбранных нами областях исследования снежный покров играет важную роль, поскольку с октября по начало апреля снежный покров накапливается и начинает таять с ранней весны и напрямую формирует речной сток. Поэтому снежный покров считается основным предиктором модели гидрологического прогноза в данном исследовании.

На основе статистических моделей прогноза, разработанные с использованием ежедневных данных о снежном покрове, ежемесячных данных о расходе воды в реках, данных о среднемесячной температуре воздуха и ежемесячных данных об общем количестве осадков, программа строит линейные уравнения, связывающие параметры снежного покрова с объемом стока. Эти модели адаптируются под конкретные речные бассейны с учетом их климатических и топографических особенностей. На основе текущего состояния снежного покрова и климатических прогнозов программа оценивает объемы водности рек на предстоящий период (оценка стока в вегетационный период и выявление возможных рисков).

В программе MODSNOW используется коэффициент корреляции (R) для определения степени взаимосвязи между ключевыми предикторами и выходным параметром. Например, можно измерить, насколько сильно площадь снежного покрова влияет на объем весеннего стока. На этапе построения модели коэффициент корреляции помогает определить, какие параметры наиболее значимы для прогнозирования водности рек.

## Результаты и их обсуждение

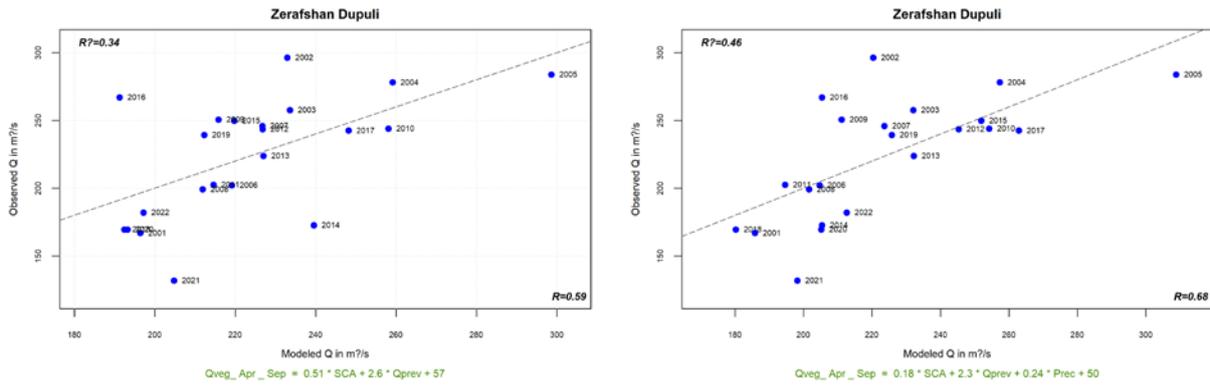
Для построения гидрологических прогнозных моделей использовался подход множественной линейной регрессии (с учетом 4х предикторов):

$$Q = a * SCA + b * Q_{prev} + c * Prec + d * Temp, \quad (1)$$

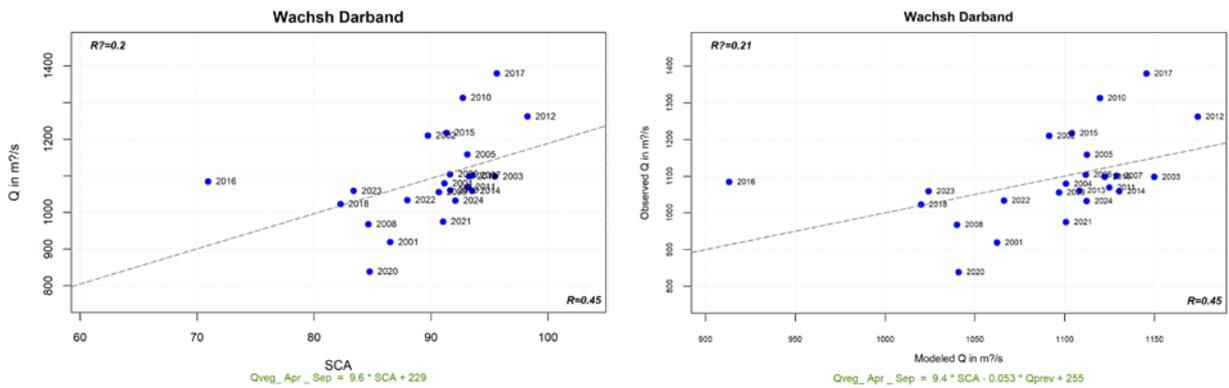
где  $Q$  – прогнозируемый расход ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $a, b, c, d$  – коэффициенты регрессионной модели,  $SCA$  – площадь снежного покрова в MODSNOW (% снежного покрова относительно площади речного бассейна),  $Q_{prev}$  – предшествующий расход ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $Prec$  – суммарное количество осадков до периода прогнозирования (мм),  $Temp$  – среднемесячная температура до периода прогнозирования ( $^{\circ}\text{C}$ ).

На рис. 4-6 показаны линейные модели для гидрологического прогноза на вегетационный период на реках Заравшан, Вахш, Нарын. В прогнозных моделях снежный покров, расход воды и осадки использовались в качестве основных предикторов для прогнозирования расхода воды в реках.

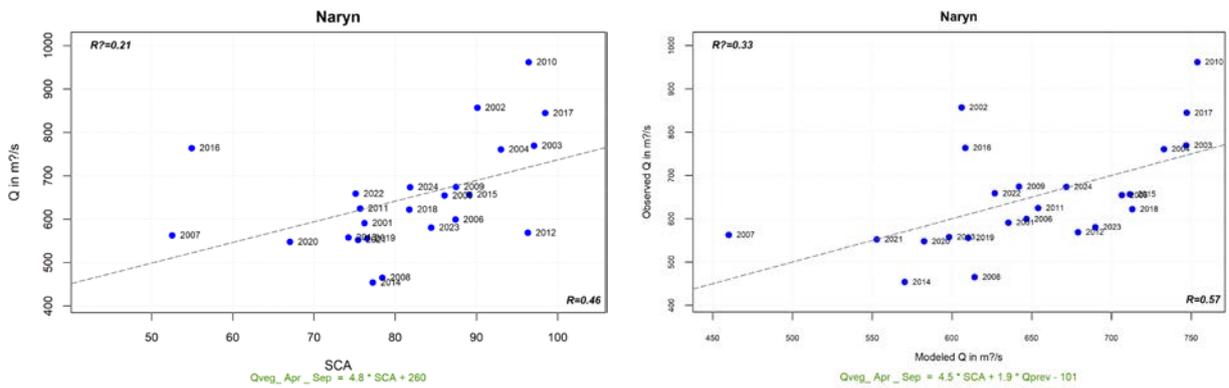
В таблице приведены рассчитанные гидрологические модели и их результаты в сравнении с прогнозными данными, полученными в НИЦ МКВК, а также с фактическими результатами за вегетационный период. Для р. Заравшан расход воды за вегетационный период по фактическим данным отсутствует.



**Рис. 4. Гидрологические прогнозные модели за вегетационный период расхода воды на реке Зеравшан**



**Рис. 5. Гидрологические прогнозные модели за вегетационный период расхода воды на реке Вахш**



**Рис. 6. Гидрологические прогнозные модели за вегетационный период расхода воды на реке Нарын**

Таблица

## Гидрологические прогнозные модели на вегетационный период

| №                  | Расчетное уравнение                     | R    | Результат прогноза, (м <sup>3</sup> /с) | Прогноз НИЦ МКВК, (м <sup>3</sup> /с) | Итого за вегетацию, (м <sup>3</sup> /с) | Отклонение прогноза Факт-НИЦ МКВК (%) | Отклонение прогноза Факт-MODSNOW (%) |
|--------------------|---|------|---|---------------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Р. Вахш</b>     |   |      |   |                                       |   |                                       |                                      |
| 1                  | $9.6*SCA+229$                           | 0.45 | 1148                                    | 1592                                  | 1037                                    | 35                                    | 10                                   |
| 2                  | $9.4*SCA-0.053*Q_{prev}+255$            | 0.45 | 1143                                    |                                       |   |                                       | 9                                    |
| <b>Р. Нарын</b>    |   |      |   |                                       |   |                                       |                                      |
| 3                  | $4.8*SCA+260$                           | 0.46 | 688.24                                  | 958.50                                | 676.27                                  | 29                                    | 2                                    |
| 4                  | $4.5*SCA+1.9*Q_{prev}-101$              | 0.57 | 695.6                                   |                                       |   |                                       | 3                                    |
| <b>Р. Заравшан</b> |   |      |   |                                       |   |                                       |                                      |
| 5                  | $0.51*SCA+2.6*Q_{prev}+57$              | 0.59 | 210.05                                  |                                       |   |                                       |                                      |
| 6                  | $0.18*SCA+2.3+Q_{prev}+0.24*Pr_{ес}+50$ | 0.68 | 217.97                                  |                                       |   |                                       |                                      |

Для построения прогнозных моделей для рек Вахш и Нарын использовались два предиктора снежный покров и расход воды. Эти параметры были выбраны с учетом их коэффициентов корреляции (приблизительно 0,5 и 0,6), а также их близким расчетным значением с фактическими результатами за вегетационный период. По результатам прогноза проводимых в НИЦ МКВК на вегетационный период было получено, что водность р. Вахш на вегетацию составляет 1037 м<sup>3</sup>/с, а для р. Нарын – 676 м<sup>3</sup>/с. В случае р. Заравшан с учетом добавления в модель предиктора осадков коэффициент корреляции увеличивается (приблизительно 0,7), расход воды в моделях варьируется от 210 до 217 м<sup>3</sup>/с.

По результатам сравнения фактической водности с прогнозами выполненными методом алгоритма поиска водности по годам-аналогам и MODSNOW установлено, что по р. Вахш отклонение факта от прогноза НИЦ МКВК составляет 35%, а от прогноза MODSNOW 9 – 10 %. По р. Нарын наблюдается 25 % отклонения факта от прогноза НИЦ МКВК, и только 2 – 3 % отклонения от MODSNOW.

## Рекомендации

Для усовершенствования данного метода в MODSNOW, рекомендуется включения в алгоритм расчета расходов воды ледовой составляющей (отсутствующей в первых версиях).

## Заключение

Для улучшения точности прогнозов стока и минимизации отклонений между фактическими данными и расчетами НИЦ МКБК, предлагается усовершенствование методики за счет включения фактора снежного покрова в зонах формирования стока.

Поэтому основной целью данного исследования было составление гидрологического прогноза на вегетационный период 2024г. стока рек Заравшан, Вахш и Нарын с использованием специализированного программного обеспечения MODSNOW. Для достижения этой цели были созданы гидрологические прогнозные модели с использованием трех предикторов. Самым высоким коэффициентом корреляции прогнозных моделях была для р. Заравшан. Для рек Вахш и Нарын коэффициент корреляции был значительно ниже, но расчетные значения по прогнозным моделям были близки к фактическим данным.

Модель MODSNOW, использующая данные спутникового мониторинга снежного покрова MODIS, демонстрирует значительно меньшие отклонения (9–10% для Вахша и 2–3% для Нарына) по сравнению с традиционными методами НИЦ МКБК.

Прогностические модели для рек Заравшан, Вахш и Нарын, построенные в программе MODSNOW, основаны на трех ключевых предикторах на снежном покрове, расходе воды и осадках. Эти параметры обеспечивают точность прогнозов, так как отражают основные процессы, формирующие сток в горных бассейнах. Такой подход позволяет оперативно и надежно прогнозировать водность рек в условиях сложной топографии и климатических изменений.

НИЦ МКБК поддерживает постоянную связь с разработчиками MODSNOW. Планируется провести тренинг и установить в НИЦ последнюю версию данной программы, учитывающую ледовую составляющую.

## Литература

1. Калашникова О.Ю., Гафуров А.А., Оморова Э.А. Прогноз водности реки Нарын на месяцы вегетации на основе снимков MODIS, Наука, Новые технологии и инновации Кыргызстана, №3, 2020, стр. 14-18. DOI:10.26104/NNTIK.2019.45.557
2. A. Gafurov, S. Ludtke, K. Unger-Shayesteh, S. Vorogushyn, T. Schone, S. Schmidt, O. Kalashnikova, B. Merz. MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data, Environ Earth Sci (2016) 75:1078, pp 1 – 15. DOI 10.1007/s12665-016-5869-x
3. Ниязов Дж. Б., Калашникова О. Ю., Гафуров А. А. Методика прогноза водности высокогорных рек Центральной Азии на основе снимков MODIS, Центрально-азиатский журнал исследований воды (2020) 6(2), стр. 26-37. doi: 10.29258/CAJWR/2020-R1.v6-2/26-37.rus
4. База знаний по использованию земельных и водных ресурсов бассейна Аральского моря // Реки // [Электронный ресурс]. Режим доступа [http://cawater-info.net/bk/water\\_land\\_resources\\_use/docs/rivers.html](http://cawater-info.net/bk/water_land_resources_use/docs/rivers.html) (дата обращения: 29.11.2024)