

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 551.48(235.216)

doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-507-517

Использование наземных и спутниковых данных о снежном покрове для прогноза стока реки Нарын

© 2017 г. О.Ю. Калашникова^{1*}, А.А. Гафуров²¹Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызская Республика;²Немецкий Исследовательский Центр наук о Земле, Потсдам, Германия

*o.kalashnikova@caiag.kg

Water availability forecasting for Naryn River using ground-based and satellite snow cover data

O.Y. Kalashnikova^{1*}, A.A. Gafurov²¹Central-Asian Institute for Applied Geosciences, Bishkek, Kyrgyz Republic; ²GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

*o.kalashnikova@caiag.kg

Received November 21, 2016

Accepted February 8, 2017

Keywords: *Naryn River basin, MODIS satellite images, seasonal forecast, snow cover, snow depth.*

Summary

The main source of river nourishment in arid regions of Central Asia is the melting of seasonal snow accumulated in mountains during the cold period. In this study, we analyzed data on seasonal snow cover by ground-based observations from Kyrgyzhydromet network, as well as from MODIS satellite imagery for the period of 2000–2015. This information was used to compile the forecast methods of water availability of snow-ice and ice-snow fed rivers for the vegetation period. The Naryn river basin was chosen as a study area which is the main tributary of Syrdarya River and belongs to the Aral Sea basin. The representative meteorological stations with ground-based observations of snow cover were identified and regression analysis between mean discharge for the vegetation period and number of snow covered days, maximum snow depth based on in-situ data as well as snow cover area based on MODIS images was conducted. Based on this information, equations are derived for seasonal water availability forecasting using multiple linear regression analysis. Proposed equations have high correlation coefficients ($R = 0.89 \div 0.92$ and $\bar{S}/\bar{\sigma} = 0.39 \div 0.48$) and forecasting accuracy. The methodology was implemented in Kyrgyzhydromet and is used for forecasting of water availability in Naryn basin and water inflow into Toktogul Reservoir.

Citation: Kalashnikova O.Y. Gafurov A.A. Water availability forecasting for Naryn River using ground-based and satellite snow cover data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017. 57 (4): 507–517. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-507-517

Поступила 21 ноября 2016 г.

Принята к печати 8 февраля 2017 г.

Ключевые слова: *бассейн реки Нарын, высота снежного покрова, прогноз стока рек на период половодья, снежный покров, спутниковые снимки MODIS.*

Проанализированы данные о сезонном снежном покрове за 2000–2015 гг. на основе спутниковых снимков MODIS и наземных наблюдений на шести метеостанциях: Тянь-Шань, Нарын, Ит-Агар, Чаек, Тюя-Ашуу и Суусамыр. Данные MODIS использованы для определения доли площади в бассейнах притоков Нарына. Расчёт водности рек на период половодья выполнен на основе анализа снежного покрова по наземным и спутниковым данным.

Введение

Для стран Центральной Азии роль водных ресурсов особенно велика в весенне-летний период, когда наполняются водохранилища, используемые для производства электроэнергии и ирригацион-

ных целей. Водность реки Нарын и пополнение запасов воды Токтогульского водохранилища для стран, расположенных в верхнем течении Нарына, — Кыргызстана и ближайших соседних территорий, важнее всего для целей энергетики, а для стран, находящихся в нижнем течении На-

рына, — Узбекистана, Казахстана и Туркменистана — для ирригационных целей. Основной сток р. Нарын (70–80% годового стока) формируется с мая по сентябрь, когда необходимо не только максимально наполнить Токтогульское водохранилище для использования сбросной воды в зимний отопительный период, но и обеспечить засушливые регионы Центральной Азии поливной водой для орошаемого земледелия. Именно поэтому качественная и достоверная информация об ожидаемой водности р. Нарын в весенне-летний период очень важна для планирования использования водных ресурсов и водodelения между трансграничными государствами Центральной Азии.

Талая вода сезонного снежного покрова — один из самых важных компонентов формирования речного стока в засушливых районах Центральной Азии. Снег составляет до 70% общего количества осадков и обеспечивает 60% суммарного речного стока в Тянь-Шане [1]. Методы, применяемые для расчёта стока рек в мае–сентябре в системе оперативного гидрологического прогнозирования национальных гидрометеослужб, основаны на уравнениях линейной корреляционной зависимости с осадками за холодный период (октябрь–апрель) [2], в том числе и для рек Нарынского бассейна [3]. Эти методы были разработаны и предложены для оперативного прогнозирования в САНИГМИ (Ташкент). В советское время были также разработаны методы, основанные на запасе воды в снеге [4]. Создание методик для рек со значительной долей ледникового и снегового питания — очень сложная задача, так как для вычисления водозапаса необходимы снегомерные маршрутные съёмки на склонах разных экспозиций и крутизны. Зимой самые верхние зоны обычно недоступны для измерений, поэтому используется приём экстраполяции, не позволяющий получить реальные значения снегозапасов [4].

Наземные наблюдения сети метеостанций (ГМС) Гидрометеослужб за продолжительностью залегания снежного покрова и его максимальной высотой также могут использоваться для прогноза водности рек на период половодья. Кроме наземных данных, значительный потенциал содержит также информация о снежном покрове со спутниковых снимков. Это особенно важно для высокогорных районов, где нередко отсутствуют наземные наблюдения. Возможность применения спутниковой информации о снежном по-

крове для прогноза водности рек впервые показал А. Rango [5]. Он использовал данные о площади снежного покрова с 1 по 20 апреля со спутниковых снимков ЕССА и NOAA за 1967–1972 гг. и получил хорошие взаимосвязи со стоком на вегетационный период (апрель–июль) для рек Инд (территория Индии и Пакистана) и Кабул (территория Афганистана). Полученные уравнения линейной регрессии им были использованы для прогноза стока рек на вегетационный период 1974 г. с ошибками 7% для р. Инд и 2% для р. Кабул по сравнению с фактическими показателями.

Данные снежного покрова спутниковых снимков MODIS использованы также для прогноза стока на вегетационный период в высокогорном регионе Аргентины (водосборы рек Мендоса, Тунуйян, Диаманте, Атуэль) [6]. Полученные уравнения линейной регрессионной зависимости площади снежного покрова и стока за летний период для каждого водосбора имеют коэффициенты корреляции $R^2 = 0,8$ и оправдываемость прогнозов водности рек 85%. Используются данные снежного покрова MODIS в гидрологической модели VIC [7], по которой был составлен прогноз сезонного стока рек с 1 марта, с 1 апреля и с 1 мая до конца июля, а также краткосрочный (на две недели) прогноз стока. Лучшие результаты получены для прогноза стока на апрель и май при наличии значительного снежного покрова. Оправдываемость прогнозов стока рек на период с апреля по июль составила 59%, а краткосрочных прогнозов на две недели — 54%.

Авторы работы [8] изучали взаимосвязь динамики стока сибирских рек Обь, Енисей и Лена с изменением площади снежного покрова на их водосборах и рекомендовали использовать спутниковые снимки для применения в оперативном прогнозировании. В исследовании [9] отмечена тесная связь (коэффициент корреляции 0,88) между площадью снежного покрова со спутниковых снимков MODIS (с восьмидневным шагом) и стоком р. Хунза (приток р. Инд) на период апрель–сентябрь. Все эти исследования показывают, что существует достаточно тесная взаимосвязь между сезонным стоком и снежным покровом со спутниковых изображений, которая может использоваться для гидрологического прогнозирования.

Впервые спутниковая информация для прогноза притока воды в Токтогульское водохранилище применена в 2000-х годах в гидрологиче-

ской модели Мартинца–Ранго SRM (Snowmelt Runoff Model) [10]. Использовалась информация со снимков NOAA (AVHRR) для составления краткосрочных прогнозов (на период 1–5 дней). Основная проблема состояла в сложности дешифрирования информации о снежном покрове, так как облачный покров удалялся вручную в программе ERDAS. Кроме того, пространственное разрешение снимка 1100 м позволяло использовать информацию о снежном покрове только для значительных по площади бассейнов. Из-за сложности дешифрирования снимков и отсутствия методики на долгосрочный период прогноза метод не был принят в практику оперативного прогнозирования Кыргызгидромета и остался лишь в проектной разработке.

Основная задача настоящей работы – исследование эффективности использования наземной и спутниковой информации о снежном покрове для прогноза стока в период половодья и малово-

дья и предупреждения многоводья на р. Нарын в её верхнем и нижнем течении. В статье приведены результаты этих исследований.

Объект исследования и данные

В качестве исследования мы выбрали Нарынский речной бассейн (рис. 1) – основной приток р. Сырдарья, второй по величине реки в Центральной Азии. Водные ресурсы р. Нарын образуются во Внутреннем Тянь-Шане и берут начало в ледниках массива Ак-Шийрак, в верховьях рек Большой и Малый Нарын. Площадь водосбора бассейна р. Нарын, выше створа в Токтогульское водохранилище, составляет около 58 тыс. км²; 1369 км² занимают ледники [11]. Диапазон высот Нарынского водосбора – от 864 до 4996 м над ур. моря (все высоты в статье даны над уровнем моря). В бассейне

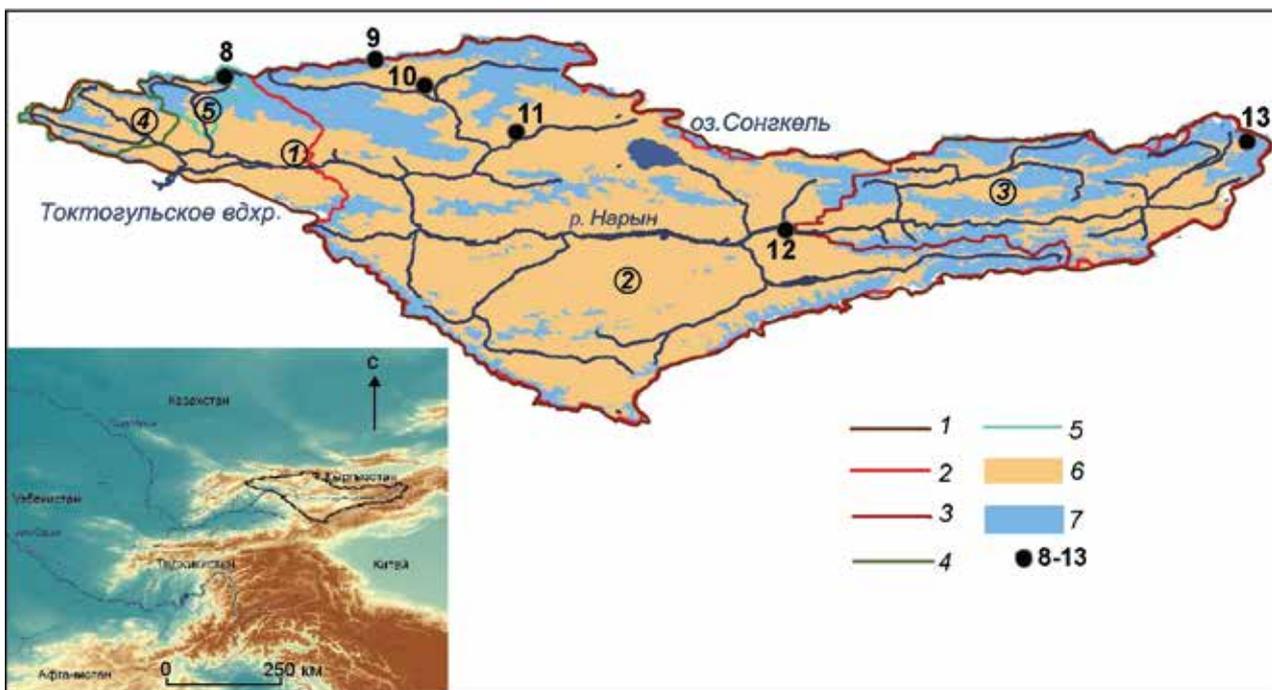


Рис. 1. Карта-схема расположения исследуемого бассейна р. Нарын и схема снежного покрова на территории Нарынского бассейна на 30 апреля 2015 г.

Границы бассейнов рек: 1 – Нарын – приток воды в Токтогульское водохранилище; 2 – р. Нарын – с. Уч-Терек (основной створ притока в Токтогульское водохранилище); 3 – р. Нарын – г. Нарын; 4 – р. Узун-Акмат – устье р. Уста-Сай (боковой приток в Токтогульское водохранилище); 5 – р. Чычкан – устье р. Бала-Чычкан; 6 – земная поверхность; 7 – снежный покров; 8–13 – ГМС: 8 – Ит-Агар; 9 – Тюя-Ашуу; 10 – Суусамыр; 11 – Чаек; 12 – Нарын; 13 – Тянь-Шань

Fig. 1. Scheme map of snow cover in the territory Naryn River basin for 30 April 2015.

Boundaries of river basins: 1 – Naryn R. – inflow to Toktogul Reservoir; 2 – Naryn River – Uch-Terek village (main gauge of inflow to Toktogul Reservoir); 3 – Naryn River– Naryn City; 4 – Uzun-Akmat River – Usta-Say estuary (lateral inflow to Toktogul Reservoir); 5 – Chychkan River – Bala-Chychkan estuary (lateral inflow to Toktogul Reservoir); 6 – surface without snow cover; 7 – surface with snow cover; 8–13 – meteorological stations: 8 – It-Agar; 9 – Tya-Ashuu; 10 – Suusamyр; 11 – Chaek; 12 – Naryn; 13 – Tien-Shan

Таблица 1. Коэффициенты корреляции расходов воды на реках Нарынского бассейна по данным ГМС за май–сентябрь с числом дней со снежным покровом за период сентябрь–апрель

Название объекта	Метеостанции					
	Тянь-Шань	Нарын	Ит-Агар	Чаек	Тюя-Ашуу	Суусамыр
Приток воды в Токтогульское водохранилище	0,815	0,339	0,106	0,353	0,275	0,107
Р. Нарын – с. Уч-Терек	0,841	0,336	0,147	0,393	0,253	0,219
Р. Нарын – г. Нарын	0,808	0,313	0,001	0,369	0,212	0,344
Р. Узун-Акмат – устье р. Уста-Сай	0,178	0,24	0,231	0,085	0,247	–0,422
Р. Чычкан – устье р. Бала-Чычкан	0,657	0,115	0,213	0,308	0,602	0,211

реки находится Токтогульское водохранилище с проектным объёмом 19,5 млрд м³. Основные источники поступления воды в р. Нарын – талая вода от сезонного снега (42%) и грунтовые воды (44%) годового стока [12]. Питание реки за счёт дождевого стока составляет около 4%, талого ледникового – не более 10% [12], а по уточнённым расчётам 2015 г. – 5,6% [13], для верховьев р. Нарын – г. Нарын – 23,2% годового речного стока [13]. Половодье на притоках р. Нарын начинается в середине апреля, а максимальные расходы воды отмечаются в июне–июле. Основной сток реки наблюдается в мае–сентябре и составляет 70–80% годового стока.

Для расчёта общего притока воды в Токтогульское водохранилище используются данные по основному створу р. Нарын – с. Уч-Терек и двух его боковых притоков – р. Узун-Акмат – устье р. Уста-Сай и р. Чычкан – устье р. Бала-Чычкан. Данные по стоку в водосборе Нарына получены из Кыргызгидромета на период 2000–2015 гг. по створам, указанным в табл. 1. Регулярные наблюдения за снежным покровом проводит Кыргызгидромет. В статье использованы данные о высоте и продолжительности залегания снежного покрова в бассейне р. Нарын, полученные по постоянным рейкам на ГМС Тянь-Шань, Нарын, Ит-Агар, Чаек, Тюя-Ашуу и Суусамыр. Расположение ГМС на территории Нарынского бассейна показано на рис. 1.

Авторы статьи использовали информацию о снежном покрове со снимков спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) – одного из ключевых инструментов на борту американских спутников серии EOS Terra и Aqua. MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах. Пространственное разрешение снимка для дешифрирования информации о снежном покрове составляет 500 м, повторяемость съёмки одной территории 1–2 раза

в сутки со спутников Aqua и Terra. Оба спутника запущены в 2000 г., и в данном исследовании информация о снежном покрове со снимков MODIS Aqua и Terra использована с 2000 по 2015 г.

В числе основных задач нашего исследования следует отметить две: 1) оценка эффективности использования наземной информации о высоте и продолжительности залегания снежного покрова по данным наземных наблюдений и площади снежного покрова по данным спутниковых снимков MODIS с целью прогноза стока р. Нарын на период половодья; 2) расчёт и прогноз на период половодья водности рек в экстремальные по водности годы (на проверочных годах) на основе данных наземных наблюдений, а также данных о площади снежного покрова со снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool.

Методика исследования

В настоящей работе проанализированы продолжительность залегания снежного покрова и максимальная высота снежного покрова за период с 2000 по 2015 г. по данным следующих ГМС, находящихся на различных высотах: Тянь-Шань, высота 3639 м; Тюя-Ашуу – 3090 м; Суусамыр – 2087 м; Нарын – 2044 м; Ит-Агар – 2011 м; Чаек – 1642 м. Построенная корреляционная матрица позволила выделить репрезентативные ГМС и предложить уравнения на основе простой линейной зависимости для расчёта водности рек Нарынского бассейна в период половодья. Для расчёта площади снежного покрова бассейнов исследуемых рек применялась спутниковая информация снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool, которая позволяет удалять облачный покров в пределах района исследования [14].

В настоящее время в Гидрометцентрах Кыргызстана, Казахстана, Туркменистана и Узбе-

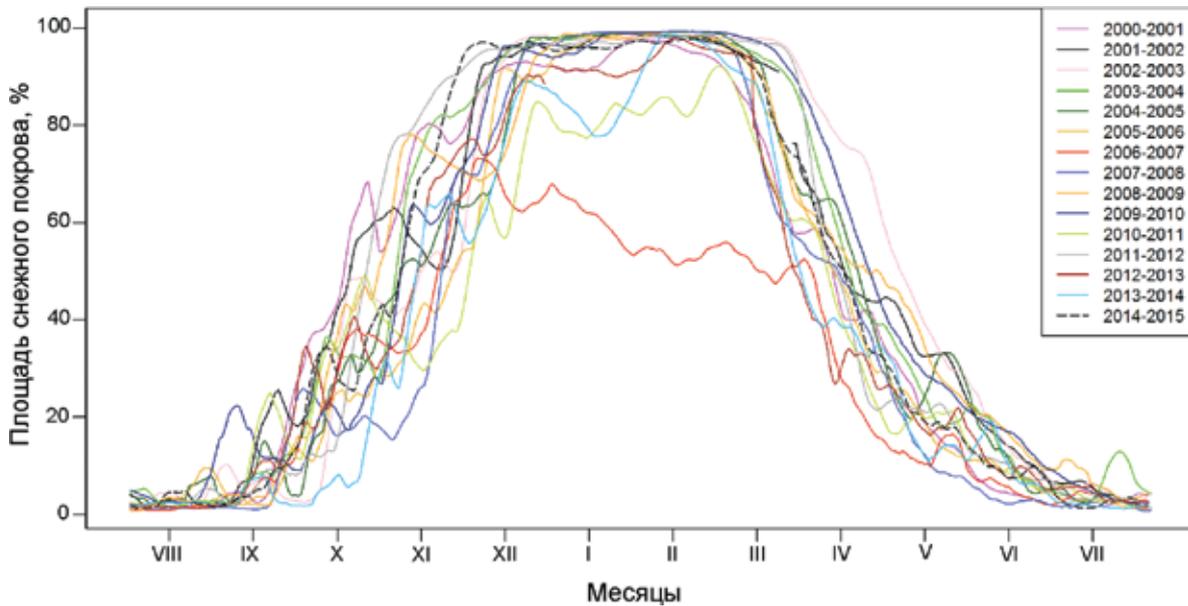


Рис. 2. Динамика снежного покрова за период с 2000 по 2015 г.
Fig. 2. Dynamics of snow cover for the period 2000–2015

кистана установлено программное обеспечение MODSNOW-Tool [15], разработанное в рамках проекта CAWa (www.cawa-project.net). Оно используется в оперативном режиме для мониторинга снежного покрова в горных регионах Центральной Азии. Программа имеет несколько модулей, которые в автоматическом режиме скачивают данные MODIS с сервера NSIDC (National Snow and Ice Data Center), соединяют и преобразуют оригинальные данные в формат GeoTIFF, выделяют водосбор и создают для него карты снежного покрова на текущую дату с удалённым облачным покровом. Для некоторых бассейнов, к которым относится и приток воды в Токтогульское водохранилище, создаётся также файл в формате JPEG с рассчитанными параметрами снежного покрова. Точность удаления облаков в программе MODSNOW-Tool составляет 94% [15], точность данных о снежном покрове со спутниковых снимков MODIS по сравнению с наземными данными наблюдений за высотой снега составляет для Центральной Азии 93% [16].

С помощью программы MODSNOW-Tool обработаны ежедневные данные о площади снежного покрова бассейна р. Нарын до створа плотины Токтогульского каскада со снимков за период с 2000 по 2015 г. (рис. 2) и выбраны даты с наилучшим коэффициентом корреляции этих данных со стоком в период половодья.

Такой календарной датой оказалось 30 апреля (120-й день по Юлианскому календарю). Площадь снежного покрова для остальных водосборов рек Нарынского бассейна (S_{sn120}) на 30 апреля рассчитана в программе ArcGIS. В качестве примера на рис. 1 приводится схема снежного покрова рек Нарынского бассейна, для которых проводились расчёты на 30 апреля 2015 г. Однако в некоторые годы, например в 2008 г., несмотря на значительные площади снежного покрова, сток реки был пониженный. Это явление связано с низким базисным стоком, сохранившимся с 2007 маловодного года. Учитывая влияние грунтового питания на сток рек Нарынского бассейна в период половодья, а также значительные талую снеговую и ледниковую составляющие, мы использовали для расчёта стока на период половодья уравнения множественной линейной корреляции, рассчитанные в Excel [17]. Расчёт вёлся на основе данных о расходах воды за период половодья (май–сентябрь) и предшествующего стока (апрель) на реках Нарынского бассейна и данных о площади снежного покрова со снимков MODIS за 16 лет (2000–2015 гг.). Для суб-бассейнов со значительной ледниковой составляющей, зависящей от температуры воздуха в высокогорной зоне и её аномалий, использован дополнительный индикатор для прогноза стока рек на период половодья –

температура воздуха за летний период. Общий вид уравнений для прогноза водности рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище следующий:

$$Q_{5-9} = aS_{sn120} + bQ_4 + c; \quad (1)$$

$$Q_{5-9} = aS_{sn120} + bQ_4 + dT_{6-8} + c, \quad (2)$$

где Q_{5-9} – расход воды за период май–сентябрь; Q_4 – расход воды за апрель; S_{sn120} – площадь снежного покрова (%) по отношению к общей площади бассейна на 30 апреля; T_{6-8} – температура воздуха за летний период; a, b, c, d – коэффициенты регрессии, рассчитанные по наблюдаемым значениям.

Уравнение (1) используется для расчёта стока на реках снего-ледникового питания, например, для нижнего течения р. Нарын (гидропост р. Нарын – с. Уч-Терек) и соответственно притока в Токтогульское водохранилище, для рек Узун Акмат и Чычкан; уравнение (2) – для рек ледниково-снегового питания, например, для верхнего течения р. Нарын (гидропост р. Нарын – г. Нарын), где температура воздуха в летний период относится к важному фактору, позволяющему учитывать интенсивность таяния ледников. Как правило, для рек высокогорных районов, имеющих среднюю высоту водосбора выше 3500 м, аномальная температура воздуха приводит к низкой оправдываемости гидрологических прогнозов. Для исследуемого региона мы использовали данные о температуре воздуха по высокогорной ГМС Тянь-Шань. В целях прогноза стока в конце апреля в оперативном режиме для расчёта по уравнению (2) принимался во внимание прогноз температуры воздуха по ГМС Тянь-Шань. Качество полученной методики для составления прогнозов стока определялось по коэффициентам корреляции R и критерию эффективности прогностической методики $\bar{S}/\bar{\sigma}$ [18], определяемому по формулам

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q - Q_i)^2}{n-2}} \quad \text{и} \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}},$$

где \bar{S} – средняя квадратичная погрешность поверочных прогнозов; $\bar{\sigma}$ – среднее квадратичное отклонение предсказываемого расхода воды от нормы; Q_i – расход воды в многолетнем ряду наблюдения; \bar{Q} – норма, средний многолетний расход воды; Q – рассчитанный расход воды по тем же данным, на основании которых установ-

лена сама корреляционная связь; n – число членов многолетнего ряда.

Оценка оправдываемости прогнозов водности рек на период половодья велась по допустимой погрешности прогнозов, которая определялась по формуле $\delta = 0,674\bar{\sigma}$. Погрешностью прогноза называется разность между фактическим расходом воды и расходом воды, ожидавшимся по прогнозу. Ожидавшийся по прогнозу расход воды, сложенный с погрешностью прогноза, должен быть равен фактическому расходу воды [18].

Результаты исследований

Максимальное число дней со снежным покровом наблюдалось в 2002 г. на высокогорных ГМС Тянь-Шань и Тюя-Ашуу – соответственно 253 и 277 дней и на ГМС Суусамыр – 166 дней. На ГМС Чаек, Нарын и Ит-Агар максимальное число дней со снежным покровом отмечалось в 2012 г. – соответственно 128, 144 и 155 дней и на Ит-Агар в 2003 г. – 156 дней. Максимальная высота снежного покрова за сентябрь–июнь с 2000 по 2015 г. зафиксирована в 2003 г. на ГМС Тюя-Ашуу (195 м) и Нарын (49 см), тогда как в 2010 г. на ГМС Тянь-Шань и Чаек она была равна соответственно 52 и 43 см, а на ГМС Нарын – 48 см. В 2012 г. на ГМС Ит-Агар эта величина составила 108 см, а на ГМС Суусамыр в 2015 г. – 71 см. Таким образом, можно выделить несколько лет с чётко выраженными периодами, когда снежный покров наблюдался продолжительное время и имел максимальную высоту – 2002, 2003, 2010 и 2012 гг. Выделяются также годы с наименьшим числом дней со снежным покровом – 2007, 2013 и 2014 гг. В те же годы отмечается много- и маловодье на реках Нарынского бассейна. Анализ совмещённого гидрографа стока р. Нарын (приток в Токтогульское водохранилище) с суточными данными по высоте снега на ГМС Тянь-Шань показывает их тесную взаимосвязь (рис. 3).

Для выявления репрезентативных ГМС, имеющих высокую связь характеристик снежного покрова с водностью рек в период половодья, построена корреляционная матрица (см. табл. 1 и 2). Полученные результаты показывают, что статистически значимы для прогноза стока рек (гидропостов Уч-Терек, г. Нарын и Чычкан и притока воды в Токтогульское водохранилище) данные о числе

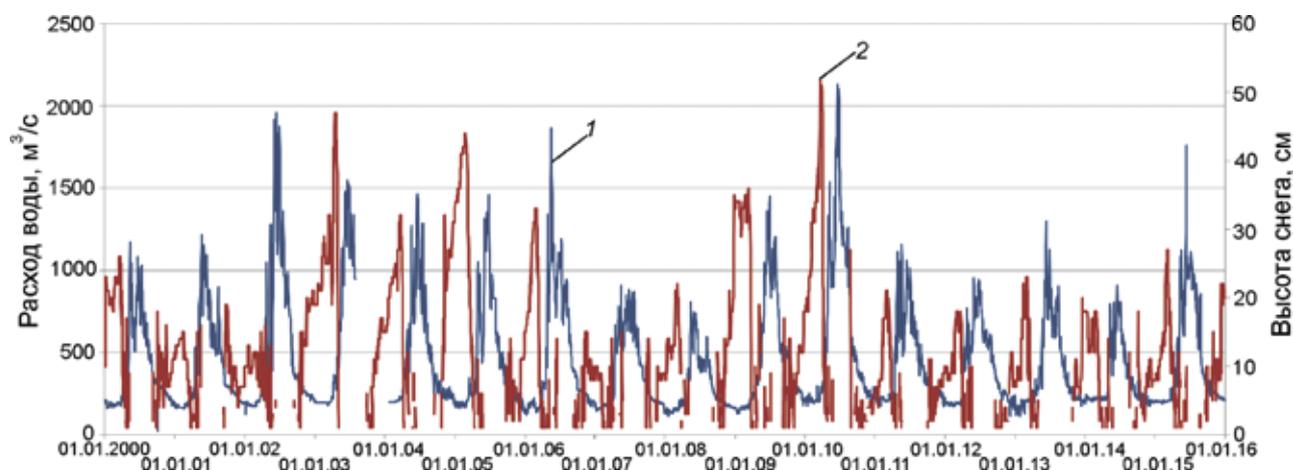


Рис. 3. График данных по высоте снега на метеостанции Тянь-Шань (1) и график совмещённого гидрографа стока р. Нарын – приток в Токтогульское водохранилище (2)

Fig. 3. Snow depth at the meteorological station Tien Shan (1) and hydrograph of Naryn River flow – inflow in Toktogul reservoir (2)

Таблица 2. Коэффициенты корреляции расходов воды на реках Нарынского бассейна по данным ГМС за май–сентябрь с максимальной высотой снежного покрова за сентябрь–апрель

Название объекта	Метеостанции					
	Тянь-Шань	Нарын	Ит-Агар	Чаек	Тюя-Ашуу	Суусамыр
Приток воды в Токтогульское водохранилище	0,70	0,67	−0,11	0,59	0,33	0,18
Р. Нарын – с. Уч-Терек	0,69	0,67	−0,15	0,63	0,32	0,15
Р. Нарын – г. Нарын	0,31	0,35	−0,21	0,38	0,34	0,15
Р. Узун-Акмат – устье р. Уста-Сай	0,46	0,45	0,01	0,00	0,46	0,07
Р. Чычкан – устье р. Бала-Чычкан	0,11	0,13	−0,28	0,013	0,51	0,04

дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь–апрель) по высокогорной ГМС Тянь-Шань, имеющие наиболее тесную зависимость $R = 0,66 \div 0,84$. Данные о максимальной высоте снежного покрова по ГМС Тянь-Шань, Нарын, Чаек и Тюя-Ашуу имеют менее тесную зависимость со стоком рек на период половодья. Для реки Узун-Акмат коэффициенты корреляции с данными о максимальной высоте снежного покрова на ГМС Тянь-Шань, Нарын и Тюя-Ашуу оказались низкими и составили 0,45–0,46, а с продолжительностью залегания снежного покрова ещё меньше.

Для получения надёжного и достоверного прогноза стока в период половодья в качестве аргументов для уравнений использованы данные о числе дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь–март) на ГМС Тянь-Шань, имеющие более тесные зависимости со стоком, чем данные о максимальной толщине снежного покрова. Коэффициент корреляции рассчитанных уравнений линейных зависимостей $R = 0,66 \div 0,84$,

а критерий применимости качества прогнозов $S/\sigma = 0,54 \div 0,75$ (табл. 3). Оправдываемость прогнозов за период с 2000 по 2015 г. по р. Нарын составила 67–81%, а по р. Чычкан – только 50%.

Для проверки предлагаемых уравнений принят следующий подход: 1) для расчёта проверочных прогнозов выделены два года с аномальной водностью (много- и маловодный) и один год средний по водности; 2) исключая из анализа эти три года, определяем коэффициенты для уравнений; 3) с помощью новых формул рассчитаны «прогнозы» на период половодья для проверочных лет как было описано ранее в методике; 4) рассчитана оправдываемость методики для этих проверочных лет с помощью фактических данных, которые не вошли в определение коэффициентов формулы.

Расчёты стока по предложенным уравнениям, где в качестве предиктора использовались данные о числе дней со снежным покровом по трём проверочным годам: многоводному – 2002 г., маловодному – 2008 г. и среднему по водности 2009 г.

Таблица 3. Уравнения для прогноза расхода воды в реках Нарынского бассейна по данным ГМС Тянь-Шань на май–сентябрь с числом дней за холодный период (сентябрь–апрель)*

Название объекта	Расчётное уравнение	R	S/σ
Приток в Токтогульское водохранилище	$6,02N_{sn} - 417$	0,82	0,58
Р. Нарын – с. Уч-Терек	$4,94N_{sn} - 329$	0,84	0,54
Р. Нарын – г. Нарын	$1,6N_{sn} - 101$	0,81	0,59
Р. Чычкан – устье р. Бала-Чычкан	$0,25N_{sn} - 14,3$	0,66	0,75

* N_{sn} – число дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь–апрель) по данным ГМС Тянь-Шань; R – коэффициент корреляции; S/σ – критерий применимости качества прогнозов.

на период май–сентябрь, показали высокую оправдываемость прогнозов (100%) по притоку воды в Токтогульское водохранилище и в створе с. Уч-Терек, а в верхнем течении р. Нарын – створ г. Нарын прогноз на 2002 г. не оправдался. Результаты оправдываемости прогнозов по проверочным годам представлены в табл. 4. Не велись расчёты поверочных прогнозов для р. Чычкан, так как по ней нет достаточного объёма наблюдений, кроме того отсутствуют наблюдения в экстремальные по водности годы (2002, 2008, 2010 гг.). Для прогноза водности по р. Узун-Акмат нет зависимостей с данными о снежном покрове по наземным наблюдениям.

Расчёты стока на период половодья с использованием спутниковых снимков MODIS выполнены по формулам (1) и (2), предложенным авторами. Результаты расчётов стока рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище на период половодья с использованием уравнений множественной линейной регрессии показали тесную корреляционную связь с площадью снежного покрова по данным снимков MODIS и предшествующим стоком. Коэффициент корреляции $R = 0,73 \div 0,92$, а критерий применимости и качества прогнозов $S/\sigma = 0,39 \div 0,68$. Оправдываемость прогнозов за период с 2000 по 2015 г. составила 87–100%, за исключением р. Чычкан, где эта величина равна 64%. На рис. 4 показаны графики фактического (1) и спрогнозированного (2) расходов воды за период половодья для притока в Токтогульское водохранилище и верховье р. Нарын – г. Нарын. Результаты расчётов линейных корреляционных зависимостей стока рек Нарынского бассейна и притока воды

Таблица 4. Результаты расчёта стока за май–сентябрь в 2002, 2008, 2009 гг. с использованием данных о количестве дней со снежным покровом по ГМС Тянь-Шань

Название объекта	Допустимая погрешность прогноза, m^3/c	Расчитанный (числитель) и фактический (знаменатель) сток, m^3/c		
		2002 г.	2008 г.	2009 г.
Приток в Токтогульское водохранилище	100	961/937	595/520	748/770
Р. Нарын – с. Уч-Терек	92,6	798/797	502/450	626/652
Р. Нарын – г. Нарын	24,8	248/303	171/162	203/181

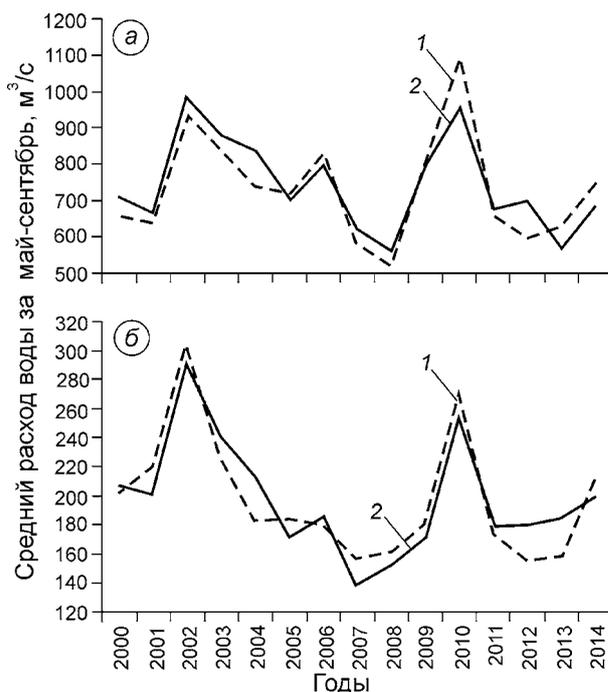


Рис. 4. График фактического (1) и спрогнозированного (2) расхода воды на период половодья:

a – по притоку воды в Токтогульское водохранилище за период 2000–2015 гг.; b – в верховьях р. Нарын – г. Нарын за период 2000–2015 гг.

Fig. 4. Observed (1) and predicted (2) water flow for the vegetation period:

a – into the Toktogul reservoir for the period 2000–2015; b – in the upper Naryn River basin – Naryn City for the period 2000–2015

в Токтогульское водохранилище представлены в виде уравнений в табл. 5. Для проверки предлагаемой методики прогноза водности на период половодья мы применили тот же подход, который использован для проверки уравнений.

Расчёты стока на период май–сентябрь по трём проверочным годам: многоводному –

Таблица 5. Уравнения для прогноза расхода воды рек Нарынского бассейна за май–сентябрь (Q_{5-9}) с площадью снежного покрова по данным спутниковых снимков MODIS в процентном соотношении от площади соответствующего бассейна и предшествующего стока за апрель*

Название объекта	Расчётное уравнение	R	S/σ
Приток в Токтогульское водохранилище	$1,02Q_4 + 9,0S_{sn120} + 62,2$	0,91	0,39
Р. Нарын – с. Уч-Терек	$0,73Q_4 + 7,29S_{sn120} + 147$	0,89	0,45
Р. Нарын – г. Нарын	$27,6T_{6-8} + 1,03Q_4 + 2,16S_{sn120} - 102$	0,92	0,39
Р. Узун-Акмат – устье р. Уста-Сай	$0,69Q_4 + 0,78S_{sn120} + 1$	0,88	0,48
Р. Чычкан – устье р. Бала-Чычкан	$0,76S_{sn120} - 12,9$	0,73	0,68

* Q_4 – расход воды за апрель; S_{sn120} – площадь снежного покрова, в процентах от общей площади бассейна рек Нарынского бассейна на 30 апреля (120-й день по Юлианскому календарю); R – коэффициент корреляции; S/σ – критерий применимости качества прогнозов.

Таблица 6. Результаты расчёта стока на период май–сентябрь в 2002, 2008, 2009 гг.

Название объекта	Допустимая погрешность прогноза, м³/с	Рассчитанный (числитель) и фактический (знаменатель) сток, м³/с		
		2002 г.	2008 г.	2009 г.
Приток в Токтогульское водохранилище	100	1010/937	529/520	783/770
Р. Нарын – с. Уч-Терек	92,6	786/797	487/450	682/652
Р. Нарын – г. Нарын	24,8	281/303	151/162	161/181

2002 г., маловодному – 2008 г. и среднему по водности 2009 г. по предложенным уравнениям показали оправдываемость прогнозов 100%; они представлены в табл. 6. Перерасчёт коэффициентов формул (1) и (2) дополняется более свежими данными за последний период. Взаимозависимости между данными о стоке за период половодья и площадью заснеженности со спутниковых снимков MODIS будут более устойчивыми и расчёт прогнозов будет возможен для всех объектов.

Заключение

Впервые для рек Нарынского бассейна и притока воды в Токтогульское водохранилище выполнен анализ эффективности использования информации о площади снежного покрова по данным спутниковых снимков MODIS, а также продолжительности залегания снежного покрова по данным ГМС сети наблюдений Кыргызгидромета за период с 2000 по 2015 г. Продолжительность и максимальная высота снежного покрова значительно изменяются из года в год и непосредственно влияют на сток рек в период половодья. Так, для р. Нарын и её притоков установлена репрезентативная ГМС

Тянь-Шань, данные которой могут использоваться для определения водности рек на текущий период половодья. Рассчитаны уравнения линейной зависимости стока рек на период половодья от числа дней со снежным покровом за холодный период (сентябрь–апрель). Оправдываемость прогнозов за период с 2000 по 2015 г. составила 67–81%, наиболее низкая оправдываемость оказалась в многоводные годы и на р. Чычкан (50%). Результаты расчёта проверочных прогнозов по двум створам (приток в Токтогульское водохранилище и р. Нарын – с. Уч-Терек) для экстремальных лет многоводного (2002 г.), маловодного (2008 г.) и среднего по водности (2009 г.) годов показали высокую оправдываемость (100%), а для верховьев р. Нарын (р. Нарын – г. Нарын) не оправдался прогноз на 2002 г. Полученные уравнения предложены для оперативного гидрологического прогнозирования. Недостаток использования предложенных уравнений в оперативном гидрологическом прогнозировании заключается в применении в качестве аргумента данных о снежном покрове лишь одной высокогорной ГМС Тянь-Шань. Таким образом, достоверность составленного прогноза зависит от качества данных, регулярности наблюдений и технической исправности ГМС. Данные о снежном покрове других ГМС не могут использоваться для получения достоверного прогноза.

В качестве предиктора для составления прогноза стока на реках Нарынского бассейна на период половодья использованы данные спутниковых снимков MODIS, обработанные в программе MODSNOW-Tool. Рассчитаны уравнения множественной линейной регрессии с двумя предикторами: площадью снежного покрова в процентном отношении от общей площади бассейна и предшествующим стоком. Использовался также третий предиктор – температура воздуха за летний

период в расчётных уравнениях для верховьев р. Нарын – г. Нарын, имеющих значительную долю ледникового питания. Оправдываемость прогнозов с использованием спутниковых снимков MODIS за период с 2000 по 2015 г. составила 87–100% (исключение р. Чычкан – 64%).

Результаты расчёта проверочных прогнозов по трём створам (приток в Токтогульское водохранилище, р. Нарын – с. Уч-Терек, р. Нарын – г. Нарын) для экстремальных лет многоводного (2002 г.), маловодного (2008 г.) и среднего по водности (2009 г.) года показали высокую оправдываемость (100%). Использование в оперативном гидрологическом прогнозировании информации о снежном покрове со спутников MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool, имеет ряд преимуществ. Географическая привязка снимка к территории, дешифрирование снимка и его классификация выполняются программой в автоматическом режиме.

Одна из проблем в определении стока рек высокогорных районов (со средней высотой выше 3500 м) на период половодья предложенными методами – получение надёжного прогноза средней температуры воздуха или её аномалий на текущий летний период к моменту составления прогноза. От температуры воздуха в летний период зависит интенсивность таяния ледников в высокогорной зоне. Основное преимущество предложенного метода – качественный и достоверный прогноз стока горных рек с использованием спутниковых изображений MODIS, что актуально для прогноза стока рек, в бассейнах которых в настоящее время не ведутся наземные наблюдения за снежным покровом. Преимущество использования спутниковой информации заключается в получении пространственной характеристики снежного покрова всего речного бассейна, тогда как информация по данным ГМС характеризует условия снегонакопления лишь в одной точке. Кроме того, в прогнозируемых бассейнах может не оказаться репрезентативной

ГМС. В таком случае составление методики прогноза стока рек будет основываться только на данных о снежном покрове со спутниковых снимков.

Методика с рассчитанными уравнениями множественной линейной регрессии передана в систему Кыргызгидромета и внедрена в 2013 г. Прогнозы, составленные по этой методике, направляются заинтересованным водохозяйственным организациям, энергетическим компаниям и МЧС. В перспективе планируется разработка методик, основанных на данных о снежном покрове со спутников MODIS, для других горных регионов Центральной Азии, особенно для бассейнов рек, находящихся в труднодоступных высокогорных районах, где сезонный снежный покров играет в формировании стока решающую роль.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта «Изменения в компонентах ледникового и талого снегового стока в Центральной Азии и социальная уязвимость» (GlaSCA-V) Фонда Фольксваген (грант AZ88501). Авторы признательны Агентству по гидрометеорологии при Министерстве по чрезвычайным ситуациям Кыргызской Республики (Кыргызгидромет) за предоставленные фондовые материалы. Научный вклад Аброра Гафурова был в рамках проекта «Вода в Центральной Азии» (CAWa) (www.cawa-project.net, грант AA7090002), финансируемого Министерством иностранных дел Германии.

Acknowledgment. This work carried out within the framework of GlaSCA-V («Changes in glacier and snow-melt runoff components in Central Asia and societal vulnerability»): project funded by the Volkswagen Foundation (contract No. AZ88501). The authors are grateful to Agency of Hydrometeorology under the Ministry of Emergency Situations of the Kyrgyz Republic (KyrgyzHydromet) for the provision of data. Abror Gafurov was supported by the CAWa («Central Asia Water») project (www.cawa-project.net, contract No. AA7090002) funded by the German Federal Foreign Office as part of the «Berlin Process».

Литература

1. Айзен В.Б., Айзен Е.М., Мелак Ж.А. Климат, снежный покров, ледники и сток в ТяньШане // Бюл. водных ресурсов. 1995. № 31 (6). С. 1113–1129.
2. Руководство по гидрометеорологическим прогнозам: Вып. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 357 с.
3. Карамолдоев Ж.Ж., Калашникова О.Ю. Прогноз притока воды в Токтогульское водохранилище на

References

1. Aizen V.B., Aizen E.M., Melak J.A. Climate, snow cover, glaciers and run-off in Tien Shan. *Bulleten' vodnykh resursov*. Bulletin of water resources. 1995, 31 (6): 1113–1129. [In Russian].
2. *Rukovodstvo po gidrometeorologicheskim prognozam*. Guidance on Hydrometeorological Forecast. V. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989: 357 p. [In Russian].

- вегетационный период // Вестн. БГУ. 2012. № 3 (23). С. 25–31.
4. *Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 419 с.
 5. *Rango A., Salomonson V., Foster J.* Seasonal streamflow estimation in the Himalayan region employing meteorological satellite snow cover observations // *Water Resources Research*. 1977. V. 13. № 1. С. 109–112. doi: 10.1029/WR013i001p00109.
 6. *Delbart N., Dunesme S., Lavie E., Madelin R., Goma M.* Remote sensing of Andean mountain snow cover to forecast water discharge of Cuyo rivers // *Journ. of Alpine Research*. 2015. № 103-2. P. 1–15.
 7. *McGuire M., Wood A., Hamlet A., Lettenmaier D.* Use of satellite data for streamflow and reservoir storage forecasts in the Snake River Basin // *Journ. of Water Resources Planning and Management*. 2015. V. 132. № 2. P. 97–110.
 8. *Yang D., Robinson D., Zhao Y., Estilow T., Ye B.* Streamflow response to seasonal snow cover extent changes in large Siberian watersheds // *Journ. of Geophys. Research*. 2003. V. 108 (D18). 4578. doi: 10.1029/2002JD003149.
 9. *Tahir A., Chevallier P., Arnaud Y., Ahmad B.* Snow cover dynamics and hydrological regime of the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011. № 15 (7). P. 2259–2274. doi: 10.5194/hess-15-2275-2011.
 10. *Мартинек Дж., Ранго А., Робертц П.* Модель талого стока: Руководство для пользователей. Изд-во Бернского университета. Географический факультет, 1998. 120 с.
 11. *Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б.* Ледники. М.: Мысль, 1989. 448 с.
 12. *Ресурсы поверхностных вод СССР: Т. 14. Средняя Азия. Вып. 1.* Л.: Гидрометеиздат, 1969. 440 с.
 13. *Коновалов В.Г.* Расчёт и прогноз составляющих стока в бассейнах рек Центральной Азии // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2015. № 3. С. 78–84.
 14. *Gafurov A., Bárdossy A.* Cloud removal methodology from MODIS snow cover products // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009. P. 1361–1373. doi: 10.5194/hess-13-1361-2009.
 15. *Gafurov A., Lüdtkе S., Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S., Schöne T., Schmidt S., Kalashnikova O., Merz B.* MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data // *Environmental Earth Science*. 2016. № 75. P. 1078. doi: 10.1007/s12665-016-5869-x.
 16. *Gafurov A., Kriegel D., Vorogushyn S., Merz B.* Evaluation of remotely sensed snow cover product in Central Asia // *Hydrology Research*. 2013. № 44. P. 506–522. doi: 10.2166/nh.2012.094.
 17. *Подрезов О.А.* Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических наблюдений: Ч. 1. Бишкек: изд. КРСУ, 2003. 262 с.
 18. *Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. 1.* Л.: Гидрометеиздат, 1962. 196 с.
 3. *Karamoldoev J.J., Kalashnikova O.Y.* Forecast of water inflow into Toktogul Reservoir during the vegetation period. *Vestnik BGU*. Bishkek: Herald of BGU. 2012, 3 (23): 25–31. [In Russian].
 4. *Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D.* *Kurs gidrologicheskikh prognozov*. Course of hydrological forecasts. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974: 419 p. [In Russian].
 5. *Rango A., Salomonson V., Foster J.*: Seasonal streamflow estimation in the Hymalayan region employing meteorological satellite snow cover observations. *Water Resources Research*. 1977, 13 (1): 109–112. doi: 10.1029/WR013i001p00109.
 6. *Delbart N., Dunesme S., Lavie E., Madelin R., Goma M.* Remote sensing of Andean mountain snow cover to forecast water discharge of Cuyo rivers. *Journ. of Alpine Research*. 2015, 103-2: 1–15.
 7. *McGuire M., Wood A., Hamlet A., Lettenmaier D.* Use of satellite data for streamflow and reservoir storage forecasts in the Snake River Basin. *Journ. of Water Resources Planning and Management*. 2015, 132 (2): 97–110.
 8. *Yang D., Robinson D., Zhao Y., Estilow T., Ye B.* Streamflow response to seasonal snow cover extent changes in large Siberian watersheds. *Journ. of Geophys. Research*. 2003, 108 (D18): 4578. doi: 10.1029/2002JD003149.
 9. *Tahir A., Chevallier P., Arnaud Y., Ahmad B.* Snow cover dynamics and hydrological regime of the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011, 15 (7): 2259–2274. doi: 10.5194/hess-15-2275-2011.
 10. *Martinek J., Rango A., Roberts R.* Model snowmelt runoff. Guidance for users. Bern. Publ.: Faculty of Geography. University of Bern, 1998: 120 p. [In Russian].
 11. *Dolgushin L.D., Osipova G.B.* *Ledniki*. Glaciers. Moscow: Mysl', 1989: 448 p. [In Russian].
 12. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR*. Surface water resources of the USSR. V. 14. Central Asia. Issue 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969: 440 p. [In Russian].
 13. *Kononov V.G.* Calculation and forecast of the runoff components in the river basins of Central Asia. *Izvestiya Ross. Akad. Nauk, Seriya Geogr.* Proc. of the RAS, Geographical Series. 2015, 3: 78–84. [In Russian].
 14. *Gafurov A., Bárdossy A.* Cloud removal methodology from MODIS snow cover products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009: 1361–1373. doi: 10.5194/hess-13-1361-2009.
 15. *Gafurov A., Lüdtkе S., Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S., Schöne T., Schmidt S., Kalashnikova O., Merz B.* MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data. *Environmental Earth Science*. 2016, 75: 1078. doi: 10.1007/s12665-016-5869-x.
 16. *Gafurov A., Kriegel D., Vorogushyn S., Merz B.* Evaluation of remotely sensed snow cover product in Central Asia. *Hydrology Research*. 2013, 44: 506–522. doi: 10.2166/nh.2012.094.
 17. *Podrezov O.A.* *Metody statisticheskoy obrabotki i analiza gidrometeorologicheskikh nablyudeniy*. Methods of statistical processing and analysis of hydrometeorological observations. Pt. 1: Bishkek, 2003: 262 p. [In Russian].
 18. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov*. Manual on the Forecast Survey. Section 3. Pt. 1. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1962: 196 p. [In Russian].