



Методика прогноза водности высокогорных рек Центральной Азии на основе снимков MODIS

Ниязов Дж. Б.^{1*}, Калашникова О. Ю.², Гафуров А. А.³

¹ Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Академии наук Республики Таджикистан

² Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли, Бишкек, Кыргызская Республика

³ Немецкий исследовательский центр наук о Земле (GFZ), Потсдам, Германия

* для корреспонденции: niyazovjafar@mail.ru

MPНТИ 87.33.31

doi: 10.29258/CAJWR/2020-R1.v6-2/26-37.rus

Подана в редакцию: 3 июля 2020; Подана после редактирования: 10 сентября 2020; Принятие к публикации: 24 ноября 2020; Доступ онлайн: 7 декабря 2020.

Аннотация

В статье исследована возможность применения спутниковой информации о снежном покрове для краткосрочного гидрологического прогнозирования на реках Центральной Азии с высокогорными бассейнами. Целью работы является разработка методики для прогнозирования среднедекадного стока рек Варзоб и Тар на основе спутниковых снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW. Задачами исследования было проведение расчетов индекса снежного покрова (SCI) для высотных зон через 200 м для выбранных речных бассейнов; анализ тесноты зависимостей индекса снежного покрова со среднедекадными расходами воды. В результате были получены уравнения, применимые для выпуска оперативных прогнозов водности рек. Получение своевременной и достоверной информации об ожидаемой водности рек на будущую декаду позволяет лицам, принимающим решения (водохозяйственным и гидроэнергетическим организациям, органам по чрезвычайным ситуациям), планировать водообеспечение различных народнохозяйственных отраслей и принимать превентивные меры по предотвращению опасных гидрологических явлений на реках республик Таджикистан и Кыргызстан.

Ключевые слова: расход воды, снежный покров, гидрологические прогнозы, спутниковые снимки, Центральная Азия.

1. Введение

Впервые спутниковая информация о снежном покрове спутниковых снимков была применена для гидрологического прогнозирования в 1977 году в гидрологической модели Мартинек-Ранго МТС (Модель Талого Стока, или SRM – Snowmelt Runoff

Model) [Rango, 1977]. Однако пространственное разрешение снимка AVHRR (NOAA) 1,1 км позволяло использовать данные снежного покрова только для водосборов, имеющих значительные по размеру площади, кроме того, приходилось использовать спутниковые снимки, где снежный покров не был закрыт облаками. Для долгосрочного прогнозирования стока рек Центральной Азии данные снежного покрова снимков AVHRR обрабатывались с помощью программы ERDAS и интерполировались на десять дней [Pertzinger, 2002; Baumgartner, 2000].

Появление алгоритмов расчета площади снежного покрова с удалением облачности со снимков MODIS, предложенных А. Гафуровым, позволило получать данные о динамике снежного покрова ежесуточно [Gafurov, 2009]. Использование спутниковой информации о снежном покрове снимков MODIS для оперативного гидрологического прогнозирования в странах Центральной Азии стало возможным благодаря созданию им же программы MODSNOW, которая автоматически загружает снимки через интернет-связь, удаляет облачность и производит расчеты площади снежного покрова для различных речных бассейнов [Gafurov, 2016]. Пространственное разрешение снимков MODIS 500 м, как показали исследования, позволяет применять эту информацию для более широкого диапазона площадей водосборов – от 1000 кв. км и более.

Методы прогнозирования водности рек на основе снимков MODIS были успешно применены для прогноза на вегетационный период и его месяцы на реках Нарынского бассейна [Калашникова, 2015; 2017; 2020] и для прогнозов на месяцы вегетации на реках Памиро-Алая [Ниязов, 2020]. При составлении методик прогнозирования стока рек на месяцы вегетации на реках Тянь-Шаня и Памиро-Алая использовался метод, учитывающий продолжительность накопления снежного покрова по данным снимков MODIS [Гафуров, 2018; 2019]. Большая работа по региону Центральной Азии с применением снимков MODIS в статистическом моделировании была проделана Н. Арел [Arel, 2018], который показал эффективность применения информации о снежном покрове этих снимков для прогноза стока рек на сезоны.

В последние годы усилия академического сообщества направлены на предупреждение гидрологических засух в Центрально-Азиатском регионе, которое имеет важное значение для интегрированного управления водными ресурсами. Научный подход к вопросам рационального использования водных ресурсов трансграничными государствами (Узбекистан, Туркменистан, Казахстан, Таджикистан и Кыргызстан) позволяет лицам, принимающим решения, использовать эффективные методы раннего предупреждения опасных гидрологических явлений, таких как наводнения и гидрологические засухи [Gerlitz et al., 2020].

Прогноз водности рек Варзоб (Таджикистан) и Тар (Кыргызстан) важен как для планирования водных ресурсов, так и для предупреждения опасных гидрологических явлений, связанных с ожидаемым на реках маловодьем (гидрологической засухой) или многоводьем (наводнениями). В нижнем течении рек

находятся крупные города (г. Душанбе на р. Варзоб и г. Узген на р. Тар), использующие водность рек для водохозяйственных, энергетических и коммунальных нужд.

Авторы статьи имеют опыт успешного применения данных спутниковых снимков MODIS для долгосрочного гидрологического прогнозирования (на период половодья и его месяцы) для речных водосборов Памиро-Алая и Тянь-Шаня. Для разработки прогностических уравнений на декады такой подход является инновационным.

В данном исследовании была использована информация о снежном покрове, полученная со спутниковых снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW, для определения пространственной характеристики запасов сезонного снежного покрова в высокогорных бассейнах рек Варзоб и Тар.

Целью исследования является проведение анализа корреляционных зависимостей стока рек за декады и площади снежного покрова по высотным зонам через 200 м. На основе данного анализа были разработаны прогностические уравнения, которые имеют практическое значение для составления своевременных и качественных прогнозов водности рек на декады.

В статье даны основные характеристики исследуемых объектов бассейнов рек Варзоб и Тар. Также представлены формулы для расчета индекса снежного покрова, основных параметров уравнений и критериев качества разработанной методики краткосрочных гидрологических прогнозов. Результаты расчетов по этим формулам и уравнения для бассейнов рек Варзоб и Тар дают оценку качества и критериев применимости предложенной методики по прогнозу среднедекадных расходов воды на этих реках. В статье изложены преимущества разработанной методики для оперативного краткосрочного гидрологического прогнозирования.

В заключении представлены основные положения и дальнейшие перспективы исследований.

2. Материалы и методы

Два основных объекта исследования – бассейны рек Варзоб и Тар выбраны для тестирования методов прогноза среднедекадных расходов воды на основе данных снежного покрова снимков MODIS. Эти бассейны относятся к высокогорным бассейнам, имеющим схожую среднюю высоту водосбора (2700–2800 м н. у. м.) и небольшую площадь оледенения (1,6–3 % площади бассейна). Кроме того, реки Варзоб и Тар относятся к снегово-ледниковому типу питания [Шульц, 1965, с. 437, 530–531] и имеют одинаковые среднегодовые расходы воды (около 50 м³/с).

Бассейн р. Варзоб относится к Памиро-Алайской горной системе и находится на территории Таджикистана, в Центральной Азии (68°30'E–69°00'E; 37°35'N–39°5'N). Площадь бассейна р. Варзоб составляет 1270 км². Бассейн простирается в диапазоне высот от 866 до 4670 м над уровнем моря (Рис. 1). Средняя высота водосбора составляет 2670 м н. у. м. Площадь оледенения составляет 36,1 км², или 3 % площади

бассейна реки [Каталог по ледникам СССР, 1980]. Длина р. Варзоб составляет 71 км. Река является крупным правым притоком р. Кафирниган, впадающей в р. Амударья.

Бассейн р. Тар относится к Тянь-Шанской горной системе и находится на территории Кыргызстана, в Центральной Азии ($73^{\circ}40'E-74^{\circ}60'E$; $40^{\circ}00'N-40^{\circ}40'N$). Площадь бассейна р. Тар составляет 3840 км^2 . Бассейн простирается в диапазоне высот от 1346 до 4747 м над уровнем моря (Рис. 1). Средняя высота водосбора составляет 2810 м н. у. м. Площадь оледенения составляет $61,4 \text{ км}^2$, или 1,6 % площади бассейна реки [Шабунин, 2018, с. 558–559]. Длина р. Тар составляет 147 км (до гидропоста с. Чалма). Река является крупным левым притоком р. Карадарья, впадающей в р. Сырдарья.

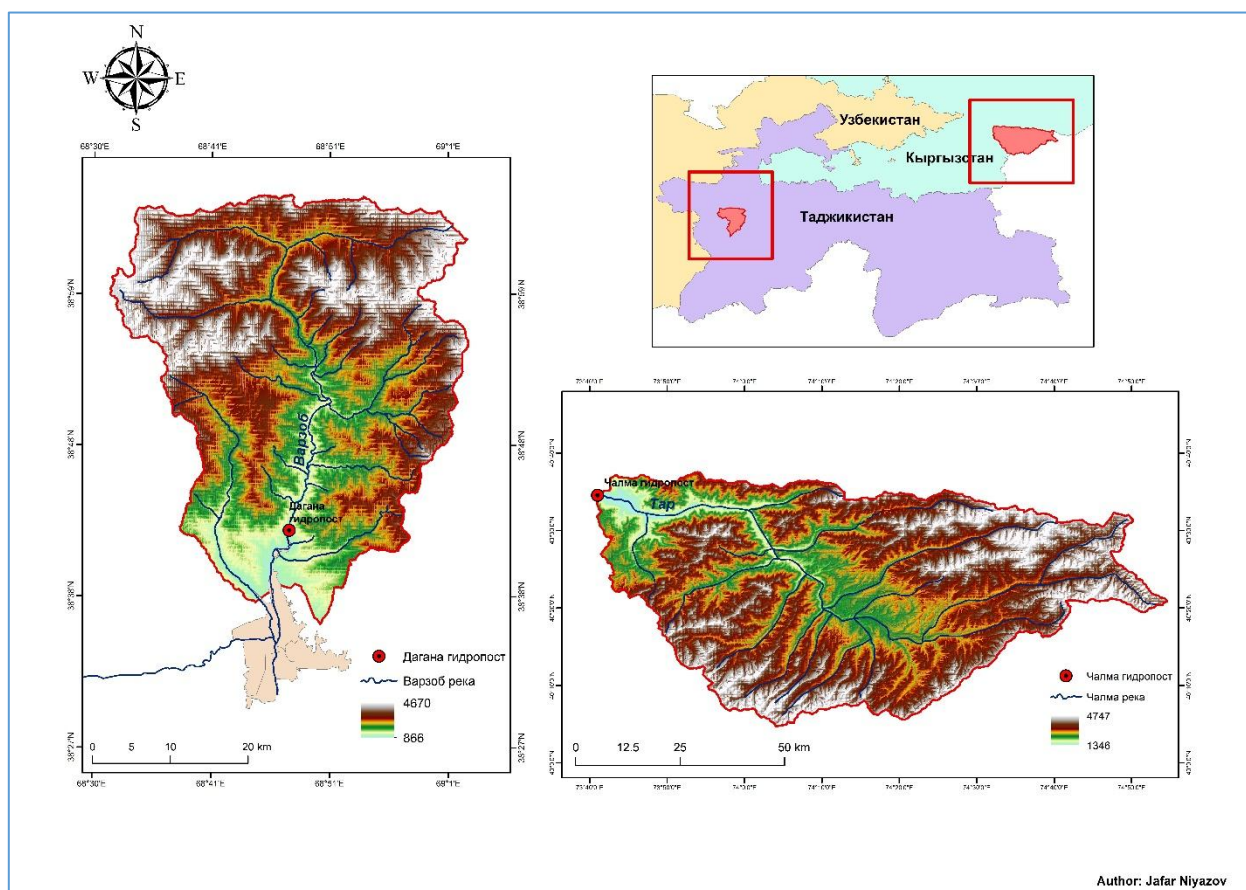


Рис. 1. Местоположение бассейнов рек Варзоб и Тар на территории Центральной Азии

Половодье на р. Варзоб наблюдается с марта по сентябрь, на р. Тар – с апреля по сентябрь. Реки относятся к снегово-ледниковому типу питания, пики паводков и максимальные расходы воды отмечаются в мае – июне. Основным источником питания рек в период половодья являются талые воды сезонного снежного покрова и, в меньшей степени, талые воды ледников, грунтовое питание и дождевые воды. В связи с этим в практике гидрологического прогнозирования учитываются запасы снега, накопившегося за холодный период времени. Информацию о высоте и водности

снежного покрова предоставляет сеть наблюдений национальных гидрометслужб. Однако точечный характер информации и редкая наблюдательная сеть не позволяют достоверно оценивать ситуацию с запасами снега в горах. В данном исследовании мы использовали информацию о снежном покрове спутниковых снимков MODIS, которая дает пространственную характеристику его распределения по высотным зонам. Данные о снежном покрове снимков MODIS обрабатывались в программе MODSNOW.

Для разработки методики прогнозов водности рек на декады использовались данные снежного покрова, рассчитанные для высотных зон через 200 м. Расчеты площади снежного покрова (SCA – snow cover area) в процентах от площади бассейна проводились на каждые сутки.

Продолжительность залегания снежного покрова (или число дней со снежным покровом) также влияет на формирование речного стока. В связи с чем использовался также индекс снежного покрова (SCI – snow cover index), который рассчитывался по формуле [Гафуров и др., 2018]:

$$SCI_t = \sum_{n=1}^{n=365/366} SCA_i, \quad (1)$$

где SCA – snow cover area, площадь снежного покрова в процентном соотношении от площади бассейна на i день (в нашем случае за каждые сутки);

SCI – snow cover index, продолжительность накопления снежного покрова на время составления прогноза (t);

n – число дней со снежным покровом для гидрологического года.

Для анализа зависимости среднедекадных расходов воды с индексом снежного покрова SCI был использован метод линейной регрессии [Подрезов, 2019].

Критерии качества методики прогнозов, а следовательно, ее применимости для целей оперативного гидрологического прогнозирования характеризуют надежность и эффективность методики. За критерий применимости и качества прогнозов принято отношение $\bar{S}/\sigma$ [Наставление по службе прогнозов, 1967].

$\bar{S}$ – средняя квадратичная погрешность поверочных прогнозов, определялась по формуле:

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q - Qi)^2}{n-2}}, \quad (2)$$

где $\bar{S}$ – средняя квадратичная погрешность поверочных прогнозов;

Qi – расход воды в многолетнем ряду наблюдения;

Q – расход воды, рассчитанный по тем же данным, на основании которых установлена сама корреляционная связь;

n – число членов многолетнего ряда.

$\bar{\sigma}$ – среднее квадратичное отклонение предсказываемого расхода воды от нормы, определялось по формуле:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее квадратичное отклонение предсказываемого расхода воды от нормы;

Q_i – расход воды в многолетнем ряду наблюдения;

$\bar{Q}$ – норма, средний многолетний расход воды;

n – число членов многолетнего ряда.

Методика прогноза считается применимой для выпуска оперативных прогнозов при следующих отношениях $\bar{S}/\bar{\sigma}$:

$$\text{при } n \leq 15 \quad \bar{S}/\bar{\sigma} \leq 0.70; \quad (4)$$

$$\text{при } 15 < n < 25 \quad \bar{S}/\bar{\sigma} \leq 0.75, \quad (5)$$

где n – число членов ряда, использованного при установлении зависимостей прогноза, или число проверочных прогнозов.

Для оценки оправдываемости прогноза устанавливается допустимая погрешность прогноза, т. е. предельное значение погрешности, при котором прогноз считается оправдавшимся. Прогноз считается оправдавшимся, если его погрешность равна или меньше допустимой погрешности прогноза. Допустимая погрешность прогноза (δ) для расхода воды принимается равной вероятному отклонению от нормы:

$$\delta = 0,674\bar{\sigma} \quad (6)$$

Как критерий применимости методики рассчитывается также обеспеченность допустимой погрешности, которая определялась как отношение количества рассчитанных по предложенной методике расходов воды попавших в пределы допустимой погрешности прогноза к общему количеству расходов воды за весь период наблюдений для каждой декады. Методика считается применимой, если обеспеченность допустимой погрешности больше 60 %.

3. Результаты исследования

Площадь снежного покрова в процентах от площади бассейна для высотных зон через 200 м была рассчитана на каждые сутки за период с 2000 по 2017 гг. для бассейнов рек Тар и Варзоб (Рис. 2).

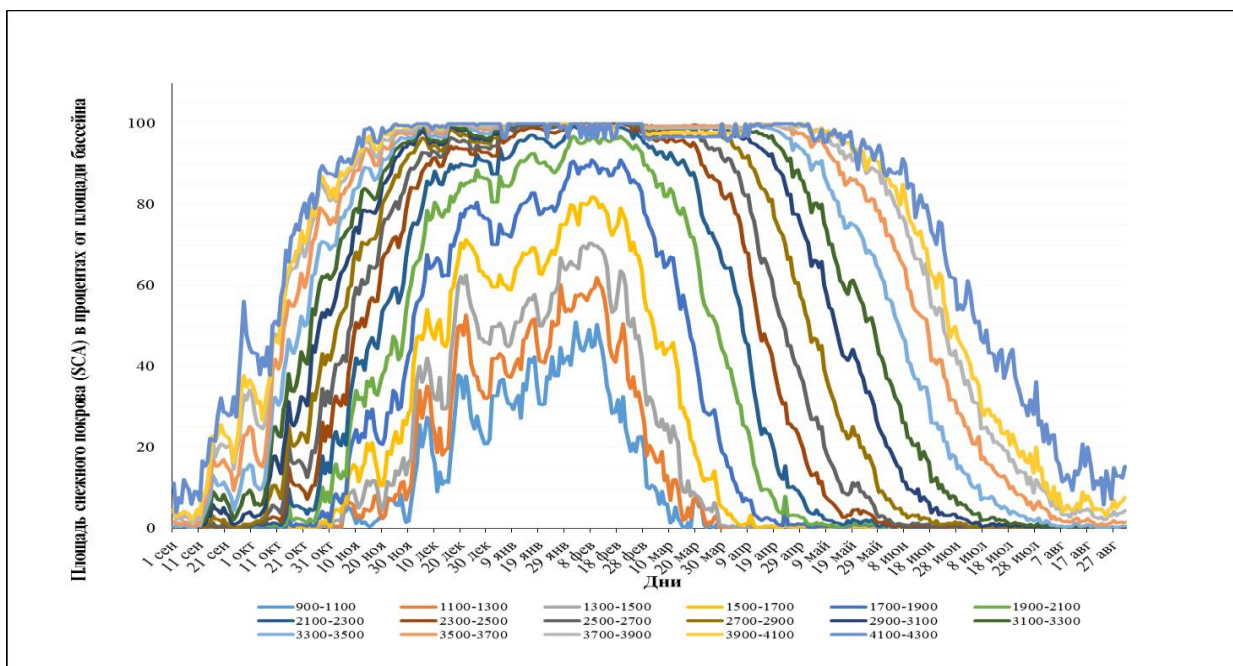


Рис. 2. Площадь снежного покрова в процентах от площади бассейна р. Варзоб по высотным зонам через 200 м

По формуле (1) был рассчитан индекс снежного покрова с 1 сентября по прогнозируемую декаду. Например, для прогноза на первую декаду мая индекс снежного покрова рассчитывался с 1 сентября по 30 апреля, для прогноза на вторую декаду мая – с 1 сентября по 10 мая и так далее.

Далее были рассчитаны коэффициенты корреляции линейных зависимостей среднедекадных расходов воды с индексом снежного покрова для высотных зон через 200 м для рек Варзоб и Тар. Наиболее высокие коэффициенты корреляции были для расходов воды за 3 декаду апреля и за период со второй декады мая по сентябрь для р. Тар и за 2 декаду апреля и за период с 3 декады мая по вторую декаду сентября для р. Варзоб. Результаты расчетов показаны на графиках Рис. 3 и Рис. 4.

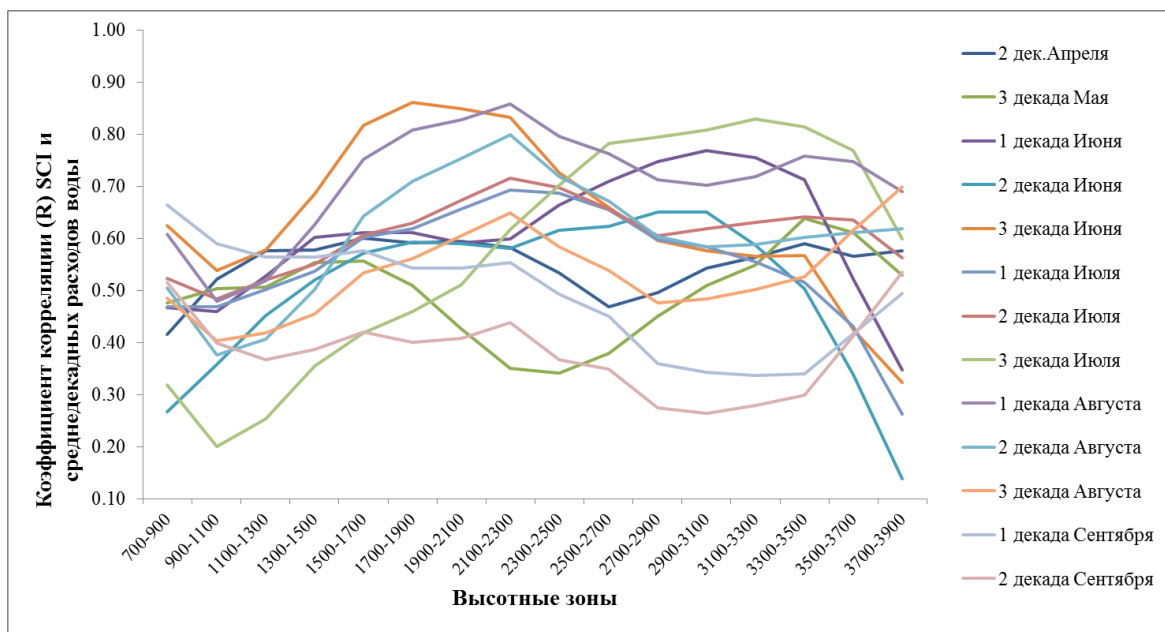


Рис. 3. Коэффициенты корреляции (R) SCI со среднедекадными расходами воды по высотным зонам через 200 м для бассейна р. Варзоб – Дагана

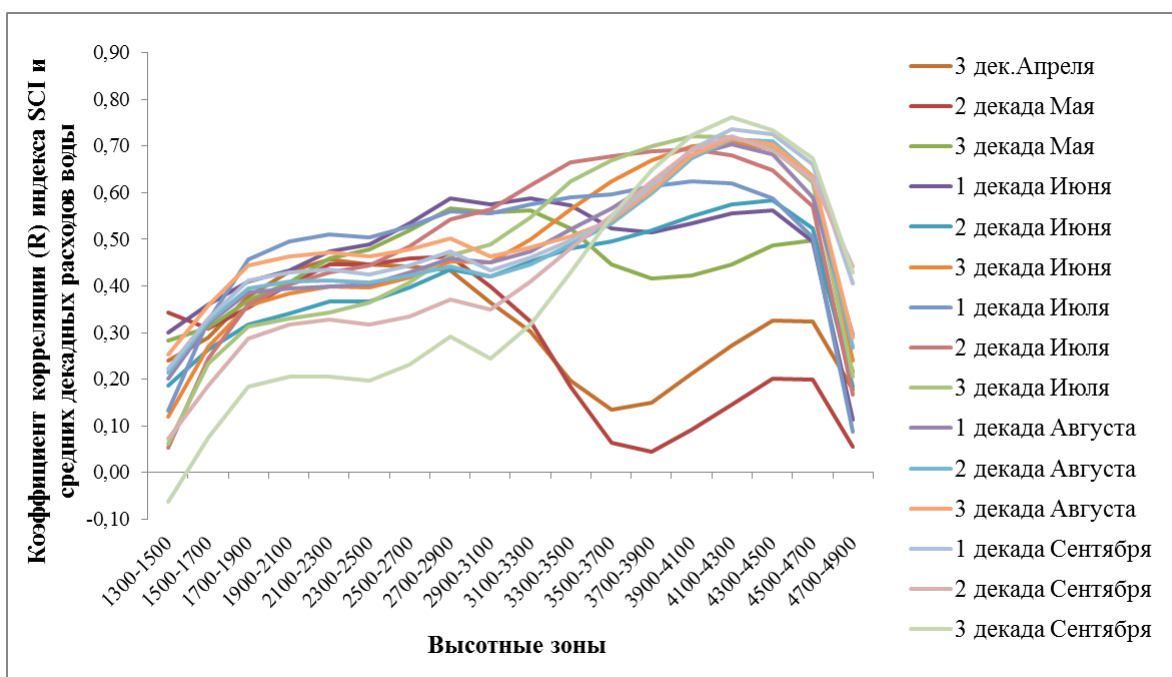


Рис. 4. Коэффициенты корреляции (R) SCI со среднедекадными расходами воды для бассейна р. Тар – с. Чалма

Анализ полученных результатов расчетов коэффициентов корреляции среднедекадных расходов воды с индексом снежного покрова для различных высотных диапазонов позволил выявить наиболее эффективные линейные зависимости и подготовить соответствующие уравнения. В Таблице 1 показаны полученные уравнения

линейной зависимости среднедекадного расхода воды на реках Варзоб и Тар с индексом SCI, коэффициенты корреляции (R), $\bar{S}/\bar{\sigma}$ и обеспеченность допустимой погрешности, рассчитанные для периода наблюдений с 2000 по 2017 гг. Лучшие результаты $\bar{S}/\bar{\sigma}$, рассчитанные по формулам (2) и (3), попадающие в категорию применимой и качественной методики, согласно формулам (4) и (5), были в период с июля по сентябрь для р. Тар и с июня по первую декаду сентября для р. Варзоб. Менее хорошие результаты $\bar{S}/\bar{\sigma}$ были для периодов с апреля по июнь для р. Тар и с апреля по май для р. Варзоб. Но при этом обеспеченность допустимой погрешности прогноза, рассчитанной по формуле (6), для всех декад за период наблюдений с 2000 по 2017 гг. составила 64–100 % для р. Тар и 78–100 % для р. Варзоб, что в критериях методики, применимой для выпуска оперативных прогнозов.

Таблица 1. Уравнения линейной зависимости средних месячных расходов воды с индексом снежного покрова SCI по высотным зонам через 200 м

Название декады	Диапазон высотных зон, м н. у. м.	Уравнения	R	$\bar{S}/\bar{\sigma}$	Обеспеченность допустимой погрешности, %
Для р. Тар – с.Чалма					
3 декада Апреля	2100-2300	64.339SCI + 26.583	0,46	0,89	86
2 декада Мая	2500-2700	118.57 SCI + 27.354	0,46	0,89	64
3 декада Мая	2700-2900	168.68 SCI + 4.7742	0,57	0,82	79
1 декада Июня	3100-3300	248.63 SCI – 40.515	0,59	0,81	86
2 декада Июня	4100-4300	581.52 SCI – 218.72	0,57	0,82	79
3 декада Июня	4100-4300	594.39 SCI – 256.54	0,71	0,70	93
1 декада Июля	4100-4300	352.72 SCI – 109.48	0,62	0,78	93
2 декада Июля	3900-4100	326.27 SCI – 132.29	0,69	0,48	100
3 декада Июля	3900-4100	230.71 SCI – 89.044	0,72	0,69	100
1 декада Августа	4100-4300	193.39 SCI – 71.329	0,70	0,71	100
2 декада Августа	4100-4300	253.45 SCI – 127.9	0,71	0,70	86
3 декада Августа	4100-4300	184.58 SCI – 88.256	0,72	0,69	86
1 декада Сентября	4100-4300	145.4 SCI – 66.314	0,74	0,67	85
2 декада Сентября	4100-4300	94.834 SCI – 34.449	0,72	0,69	85
3 декада Сентября	4100-4300	77.741 SCI – 26.938	0,76	0,65	85
Для р. Варзоб – Дагана					
2 декада Апреля	2100-2300	55.01 SCI + 42.024	0.58	0,81	78
3 декада Мая	1500-1700	33.548 SCI + 88.811	0.56	0,83	100
1 декада Июня	2700-2900	91.565 SCI + 39.746	0.75	0,66	100

2 декада Июня	2700-2900	66.534 SCI + 61.154	0.65	0,75	100
3 декада Июня	2100-2300	67.259 SCI + 54.519	0.60	0,80	100
1 декада Июля	2100-2300	52.334 SCI + 61.532	0.69	0,72	100
2 декада Июля	2100-2300	49.125 SCI + 47.773	0.72	0,69	100
3 декада Июля	2700-2900	70.668 SCI + 13.595	0.79	0,61	89
1 декада Августа	2900-3100	78.462 SCI + 7.5133	0.81	0,59	89
2 декада Августа	2100-2300	46.3 SCI + 21.451	0.86	0,51	89
3 декада Августа	2100-2300	32.015 SCI + 22.25	0.80	0,60	100
1 декада Сентября	2100-2300	19.599 SCI + 22.007	0.65	0,75	100
2 декада Сентября	2100-2300	15.439 SCI + 17.844	0.55	0,83	100

4. Обсуждение результатов

Недостаток информации об условиях накопления снега в зоне формирования стока рек Центральной Азии с высокогорными бассейнами может быть восполнен данными спутникового зондирования. Снимки MODIS, обработанные в программе MODSNOW, предоставляют информацию о суточной динамике снежного покрова и могут использоваться для разработки методик краткосрочных гидрологических прогнозов. Методика, разработанная для рек Тар (Тянь-Шань) и Варзоб (Памиро-Алай) на основе данных снежного покрова снимков MODIS, может применяться для составления прогнозов на декады. Эффективность методики для периода с июня по сентябрь для исследуемых рек попадает в категорию «хорошая» и «удовлетворительная». Для периода апрель – май качество методики оценивается как консультация, что связано с синоптической ситуацией в горных районах Центральной Азии в эти месяцы – частыми северо-западными, западными и северными вторжениями, циклонической деятельностью с осадками ливневого характера и продолжительными дождями. Ограничения в применении снимков MODIS для разработки методик прогноза стока рек существуют в разрешении снимков. Снежный покров снимков MODIS имеет пространственное разрешение 500 м, в связи с чем для рек с бассейнами менее 1000 км² их применение нецелесообразно.

5. Заключение

1. Основное преимущество примененного метода – получение качественного и надежного прогноза стока высокогорных рек с использованием спутниковых изображений MODIS, обработанных в программе MODSNOW. Это особенно важно для рек, в бассейнах которых наземные наблюдения за снежным покровом в настоящее время не проводятся или бассейны рек недостаточно освещены наблюдениями.

2. Прогнозы водности рек Варзоб и Тар очень важны для предотвращения опасных гидрологических явлений, таких как наводнения, гидрологические засухи и селевые паводки.
3. Анализ коэффициентов корреляции индекса снежного покрова (SCI), рассчитанного для высотных зон через 200 м со средним расходом воды, показал тесную зависимость за месяцы, когда талый снеговой и ледниковый сток играет решающую роль в формировании речного стока (июнь – сентябрь);
4. Коэффициенты корреляции в уравнениях составили 0,53–0,86 для р. Варзоб и для р. Тар 0,46–0,76. Критерий применимости методики $\bar{S}/\sigma = 0,51–0,83$ для р. Варзоб и 0,48–0,89 для р. Тар. Обеспеченность допустимой погрешности для р. Варзоб варьировала от 78 до 100 %, для р. Тар 64–100 %.
5. В апреле и мае коэффициенты корреляции среднедекадных расходов воды с индексом снежного покрова были низкими, т. к. погодные условия в бассейнах этих рек не позволяют делать надежные прогнозы водности в эти месяцы.
6. В перспективе исследования будут проводиться для других бассейнов горных рек Центральной Азии, где на основе данных MODIS будут разрабатываться методики для составления краткосрочных гидрологических прогнозов для оперативного применения в системе национальных гидрометслужб.

Благодарность

Эта работа была проведена при поддержке проекта CAWa (Central Asian Water) (www.cawa-project.net, грант AA7090002), финансируемого Федеральным министерством иностранных дел Германии в рамках 343-й Германской водной инициативы для Центральной Азии («Берлинский процесс»).

Список литературы

1. Apel H., Abdykerimova Z., Agalhanova M. et al. Statistical forecast of seasonal discharge in Central Asia using observational records: development of a generic linear modelling tool for operational water resource management // *Hydrology Earth System Sciences*. 2018. № 22. P. 2225–2254. doi: 10.5194/hess-22-2225-2018.
2. Baumgartner M., Spreafico M., Weiss H. Operational snowmelt runoff forecasting in the Central Asian mountains // *Remote Sensing and Hydrology 2000 (Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 2000)*. IAHS-AISH Publication. No. 267. P. 66–71.
3. Gafurov A., Bárdossy A. Cloud removal methodology from MODIS snow cover products. // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009. № 13(7). P. 1361–1373. doi: 10.5194/hess-13-1361-2009
4. Gafurov A., Kalashnikova O., Apel H. Hydrological forecast based on the snow cover index, derived from basin-wide and elevation specific remote sensing snow cover data in

- mountainous basins // *Geophysical Research Abstracts*. Vienna: EGU2019. 2019. Vol. 21. EGU2019-12817.
5. Gafurov A., Lüdtke 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(14), 1078. doi: 10.1007/s12665-016-5869-x
 6. Gerlitz L., Vorogushyn S., Gafurov A. Climate informed seasonal forecast of water availability in Central Asia: State-of-the-art and decision making context. // *Water Security*. 2020. Vol. 10. 100061. doi: 10.1016/j.wasec.2020.100061
 7. Pertzinger F., Baumgartner M., Kobilov T., Schulz A., Vaselina L. Model of snow cover formation and methodics of long term prediction of inflow into water reservoir during flood season. // *Proceedings International Conference on Flood Estimation*, Bern, Switzerland, 2002.
 8. Rango A., Salomonson V., Foster J. Seasonal streamflow estimation in the Hymalayan region employing meteorological satellite snow cover observations. // *Water Resources Research*. 1977. Vol. 13. No. 1, P. 109–112.
 9. Гафуров А., Нурбаcina А., Калашникова О. Оценка водных ресурсов в Центральной Азии методами дистанционного зондирования. // *Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири* (под ред. В. Сычева и Л. Мюллер). В 5 томах. 2018. Т. 2. С. 405–409.
 10. Калашникова О. Ю. К разработке методов долгосрочного прогноза стока горных рек и притока воды в водохранилище на примере реки Нарын // *Наука и новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2015. № 5. С. 100–103.
 11. Калашникова О., Гафуров А. Использование наземных и спутниковых данных о снежном покрове для прогноза стока реки Нарын // *Лед и Снег*. 2017. Т. 57. № 4. С. 507–517.
 12. Калашникова О. Ю., Гафуров А. А., Оморова Э. А. Прогноз водности реки Нарын на месяцы вегетационного периода на основе снимков MODIS // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2020. № 3. С. 14–18.
 13. Каталог ледников СССР (отв. ред. О. Н. Виноградов). Т. 14. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 44 с.
 14. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3, ч. 1. Л.: Гидрометеиздат. 1962. 196 с.
 15. Ниязов Дж. Б., Калашникова О. Ю., Гафуров А. А. Оценка водных ресурсов рек Памиро-Алая методами дистанционного зондирования (на примере рек Кафирниган и Гунт) // *Вестник КРСУ*. 2020. Т. 20. № 4. С. 152–157.
 16. Подрезов О. А. Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических наблюдений: учеб. для бакалавров-гидрометеорологов. Бишкек: КРСУ. 2019. 170 с.
 17. Шабунин А. Г. Каталог ледников Кыргызстана. Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ). Бишкек. 2018. 709 с.
 18. Шульц В. Л. Реки Средней Азии. Л.: Изд-во ГИМИЗ, 1965. 680 с.