

УДК 556.5(528.8)

**ОЦЕНКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕК ПАМИРО-АЛАЯ МЕТОДАМИ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РЕК КАФИРНИГАН И ГУНТ)**

Дж.Б. Ниязов, О.Ю. Калашникова, А. Гафуров

Водные ресурсы реки Амударья имеют трансграничное значение для Узбекистана, Туркменистана, Таджикистана, Афганистана и Кыргызстана. Оценка водных ресурсов в зоне формирования стока реки имеет огромное водохозяйственное и гидроэнергетическое значение и необходима для предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с наводнениями и гидрологическими засухами. Около 75 % водных ресурсов р. Амударья формируется в горной системе Памиро-Алая (на территории Таджикистана). Для оценки водности рек Памиро-Алая на месяцы вегетации (на примере рек Кафирниган и Гунт) использованы данные дистанционного зондирования. Показана возможность использования информации о снежном покрове спутниковых снимков MODIS для оценки водности рек и составления достоверного гидрологического прогноза.

Ключевые слова: водные ресурсы; оценка водных ресурсов; прогноз водности рек на месяцы; дистанционное зондирование снежного покрова; Кафирниган; Гунт; Амударья.

**ПАМИР-АЛАЙ ДАРЫЯЛАРЫНЫН СУУ РЕСУРСТАРЫН АРАЛЫКТАН
ИЗИЛДӨӨ ЫКМАСЫ МЕНЕН БААЛОО
(КАФИРНИГАН ЖАНА ГУНТ ДАРЫЯЛАРЫНЫН МИСАЛЫНДА)**

Дж.Б. Ниязов, О.Ю. Калашникова, А. Гафуров

Аму дарыянын суулары Өзбекстан, Түркмөнстан, Тажикстан, Афганистан жана Кыргызстан үчүн транс чек аралык мааниге ээ. Дарыя агымдары куралган аймактын суу ресурстарын изилдөө суу чарбасында жана гидроэнергетикада чоң мааниге ээ, ошондой эле сел агымдары жана гидрологиялык кургакчылыктар менен байланышкан өзгөчө кырдаалдардын алдын алуу үчүн керек. Аму дарыясынын суу ресурстарынын 75% га жакыны Памир-Алай тоо системасында (Тажикстандын аймагында) куралат. Изилдөөбүздө Памир-Алай дарыяларынын (Кафирниган жана Гунт дарыяларынын мисалында) вегетация айларындагы суу ресурстарын баалоодо аралыктан изилдөөнүн маалыматтарын колдонобуз. Натыйжада суу ресурстарын баалоодо жана так гидрологиялык божомолду түзүүдө кар катмарлары жөнүндө MODIS спутник сүрөттөрүн пайдалануу мүмкүнчүлүктөрү көрсөтүлдү.

Түйүндүү сөздөр: суу ресурстары; суу ресурстарын изилдөө; айлар аралыгында дарыя сууларын божомолдоо; кар катмарларын аралыктан изилдөө; Кафирниган; Гунт; Аму дарыясы.

**ASSESSMENT OF WATER RESOURCES OF THE PAMIR-ALAI RIVERS
BY REMOTE SENSING METHODS (ON THE EXAMPLE OF KAFIRNIGAN AND GUNT RIVERS)**

Dzh.B. Niyazov, O. Yu. Kalashnikova, A. Gafurov

Water resources of the Amu Darya River is the transboundary importance for Uzbekistan, Turkmenistan, Tajikistan, Afghanistan and Kyrgyzstan. Assessment of water resources in the zone of formation of rivers is of great importance for hydropower and irrigation and is necessary for the prevention of emergency situations associated with floods and droughts. About 75% of the water resources of the Amu Darya River are formed in the Pamir-Alaya mountain system (in Tajikistan). In our study, we use remote sensing data to assess the water content of the Pamir-Alai Rivers (on the example of the Kafirnigan and Gunt rivers) for the months of vegetation. The results show the possibility of using the snow cover information from MODIS satellite images to assess and make a reliable hydrological forecasts.

Keywords: water resources; assessment of water resources; forecast of water content of rivers for months; remote sensing of snow cover; Kafirnigan; Gunt; Amu Darya.

Введение. Водные ресурсы рек Кафирниган и Гунт имеют большое гидроэнергетическое и водохозяйственное значение как для Таджикистана, так и для трансграничных государств в бассейне реки Амударья. Помимо этого, бассейны рек Гунт и Кафирниган относятся к высокогорной селеопасной зоне со смешанным происхождением селей, вызванных интенсивным снеготаянием, таянием ледников, прорывом водоемов, и т. д.

В бассейне реки Кафирниган проживает около 2,5 млн человек, в бассейне реки Гунт – около 65 тыс. человек. Здесь распространены сели как дождевого типа, так и снежниковые. Снежниковые сели характерны в основном для Восточного Памира, высокогорных частей Западного Памира и Гиссаро-Алая. Селения на реке Гунт расположены прямо на конусах выноса боковых притоков, по которым часто проходят сели или есть вероятность их прохождения при катастрофических ливнях [1–3].

Информация о динамике снежного покрова в реальном масштабе времени важна как для предупреждения селевых явлений, так и для прогноза водности рек. В настоящее время широко используется информация о снежном покрове, полученная со спутниковых снимков. Существуют программы, позволяющие получать ежедневную информацию о снежном покрове с удаленным облачным покровом со снимков MODIS [4]. Программа MODSNOW-Tool была разработана и внедрена в систему национальных гидрометслужб Центральной Азии для получения информации о снежном покрове по главным бассейнам рек [5].

Данные о снежном покрове используются и для прогноза водности рек Центральной Азии, для которых сезонные запасы снега покрова играют решающую роль в формировании их стока. Впервые возможность использования данных о снежном покрове на основе спутниковой информации для прогноза стока рек была доказана А. Ранго в 1977 году [6]. Информация о снежном покрове со спутниковых снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool, была успешно использована для прогноза стока рек Тянь-Шаня [7, 8] как на период половодья, так и для прогноза рек Центральной Азии на месяцы вегетации [9].

Объект исследования и данные. Бассейны рек Кафирниган и Гунт расположены в Таджикистане, Центральная Азия и относятся к бассейну реки Амударья (67°E –74°E; 36°N-40°N) (рисунок 1).

Это высокогорные реки снегово-ледникового (Кафирниган) и ледниково-снегового (Гунт) типа питания [10].

Длина реки Гунт составляет 296 км, площадь бассейна 14,9 тыс. км², средняя высота бассейна 4170 м н.у.м., площадь оледенения занимает около 4 % от общей площади бассейна [11]. Бассейн простирается в диапазоне высот от 2063 до 6683 м над уровнем моря. Климат бассейна реки Гунт отличается своей суровостью. Восточный Памир, занимающий восточную часть бассейна, с притоком р. Алиучур отличается холодным летом и очень низким увлажнением. Западный Памир относится к типу климата с умеренно-теплым летом и также с очень низким увлажнением. Среднегодовой сток реки Гунт составляет 104 м³/с, в течение года максимальный сток и пики паводков отмечаются в июле, минимальный сток отмечается с февраля по апрель [12]. Половодье на реке Гунт наблюдается с конца апреля (начала мая) по сентябрь.

Длина реки Кафирниган составляет 387 км, площадь бассейна 12,3 тыс. км², средняя высота водосбора 4001 м н.у.м., диапазон высот бассейна от 4828 до 299 м н.у.м., площадь оледенения занимает около 1 % от общей площади бассейна [11]. Бассейн реки находится в зоне с мягким климатом, с достаточным увлажнением, умеренно теплым летом и умеренно суровой снежной зимой. Среднегодовой сток реки Кафирниган составляет 191 м³/с, половодье на реке наблюдается с конца марта (начала апреля) и заканчивается в сентябре, максимальные расходы воды и пики паводков отмечаются в мае–июне [12].

Для оценки запасов снега за холодный период времени мы использовали снимки MODIS Spectroradiometer (MODIS) с умеренным разрешением (MOD10A1 – Terra, MYD10A1 – Aqua, версия 5 и 6), данные снежного покрова MODIS имеют пространственное разрешение 500 метров. Эти данные были доступны с 2000 по 2002 г. со спутников Terra и Aqua и выпускались на весь земной шар [13, 14].

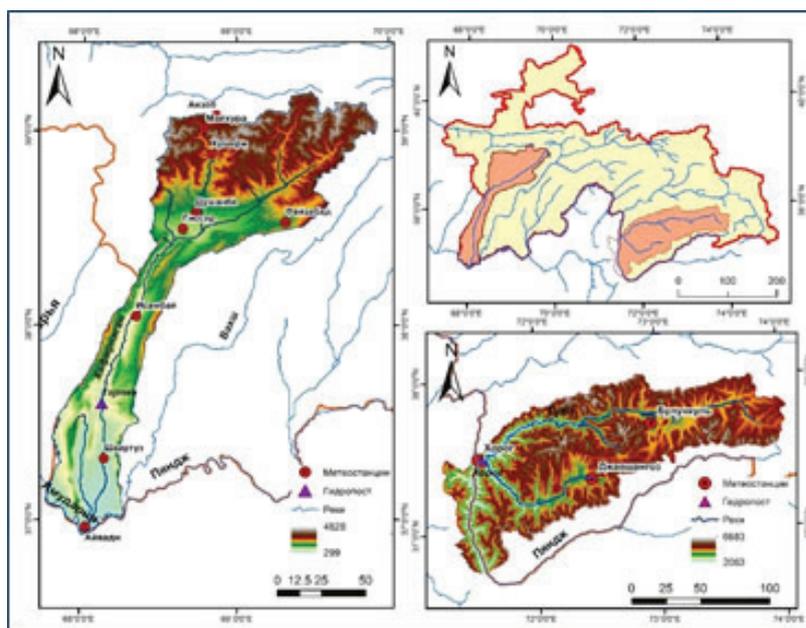


Рисунок 1 – Расположение бассейнов рек Кафирниган и Гунт

Методы исследования. Основными источниками питания горных рек являются талые (снеговые и ледниковые) воды. При диапазоне высот более 2,5–3-х км, таяние в бассейнах рек может растягиваться на 5–6 месяцев и талый сток может достигать 80–90 % от годового стока. Таким образом, использование методов, основанных на информации о снегозапасах в зоне формирования стока рек, обеспечивает качественные и надежные прогнозы на период половодья и его месяцы.

Авторы использовали данные снежного покрова снимков MODIS, обработанных в программе MODSNOW-Tool и рассчитали площадь снежного покрова для высотных зон с интервалом в 500 метров. Для каждой высотной зоны площадь снежного покрова в процентном соотношении от площади бассейна (SCA, snow cover area) рассчитывалась за сутки (рисунок 2).

Для получения информации о продолжительности накопления снежного покрова был введен индекс SCI (snow cover index), позволяющий оценить общее число дней со снежным покровом [9].

Накопление снежного покрова за холодный сезон в бассейнах рек Кафирниган и Гунт начиналось с сентября, поэтому SCI рассчитывался с 1 сентября по дату составления прогноза водности рек на месяцы. Например, для прогноза на май использовались расчеты SCI с 1 сентября по 30 апреля, для прогноза на июнь – с 1 сентября по 31 мая и т. д. на все месяцы половодья. Общая формула для расчета индекса SCI для всего гидрологического года имеет вид:

$$SCI_t = \sum_{n=1}^{n=365/366} SCA_n,$$

где SCA – snow cover area, площадь снежного покрова в процентном соотношении от площади бассейна; SCI – snow cover index, продолжительность накопления снежного покрова.

Для анализа зависимости расходов воды за месяцы вегетации и SCI был использован метод линейной регрессии [15].

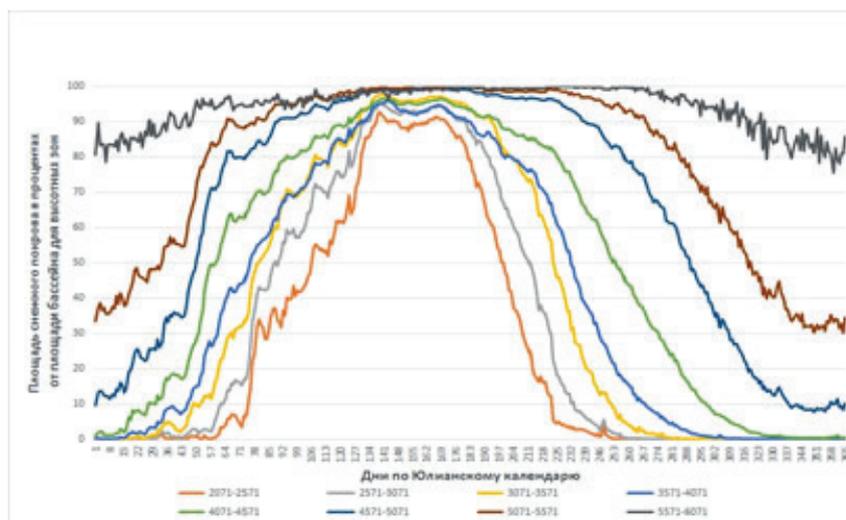


Рисунок 2 – Площадь снежного покрова (SCA) в процентах от площади бассейна по высотным зонам на примере бассейна реки Гунт – г. Хорог

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициентов корреляции средних месячных расходов воды реки Кафиниган и индекса SCI по высотным зонам

Месяц	Высотные зоны								
	436–936	936–1436	1436–1936	1936–2436	2436–2936	2936–3436	3436–3936	3936–4436	4436–4712
Апрель	0,06	0,20	0,47	0,67	0,66	0,68	0,57	0,43	0,48
Май	-0,28	-0,16	0,14	0,55	0,73	0,77	0,67	0,51	0,55
Июнь	-0,16	-0,02	0,36	0,71	0,82	0,82	0,60	0,31	0,34
Июль	-0,28	-0,12	0,25	0,70	0,87	0,91	0,83	0,64	0,57
Август	-0,38	-0,29	0,06	0,56	0,83	0,87	0,82	0,74	0,64
Сентябрь	-0,15	0,06	0,35	0,68	0,74	0,74	0,68	0,63	0,58

Таблица 2 – Результаты расчета коэффициентов корреляции средних месячных расходов воды реки Гунт и индекса SCI по высотным зонам

Месяц	Высотные зоны								
	2071–2571	2571–3071	3071–3571	3571–4071	4071–4571	4571–5071	5071–5571	5571–6071	6071–6571
Май	0,12	0,18	0,20	0,18	0,23	0,20	0,17	0,07	0,01
Июнь	0,52	0,50	0,51	0,63	0,71	0,68	0,57	0,36	0,31
Июль	0,69	0,71	0,74	0,75	0,80	0,87	0,81	0,53	0,12
Август	0,58	0,50	0,57	0,56	0,53	0,54	0,48	0,31	-0,21
Сентябрь	0,60	0,72	0,78	0,70	0,58	0,41	0,38	0,38	0,09

Таблица 3 – Уравнения линейной зависимости средних месячных расходов воды и индексом снежного покрова SCI по высотным зонам

Месяц	Высотная зона	Уравнение	Коэффициент корреляции (R)
Для реки Кафирниган			
Апрель	1936–2436	$245SCI_{9,3} + 207$	0,67
Май	2936–3436	$245SCI_{9,4} + 327$	0,77
Июнь	2936–3436	$305SCI_{9,5} + 247$	0,82
Июль	2936–3436	$286SCI_{9,6} + 108$	0,91
Август	2936–3436	$118SCI_{9,7} + 58,4$	0,87
Сентябрь	2936–3436	$36,6SCI_{9,8} + 49,1$	0,74
Для реки Гунт			
Июнь	4071–4571	$186SCI_{9,5} + 125$	0,71
Июль	4571–5071	$289SCI_{9,6} + 123$	0,87
Август	3071–3571	$99,9SCI_{9,7} + 147$	0,57
Сентябрь	3071–3571	$52,2SCI_{9,8} + 76,0$	0,78

Результаты исследования. Наиболее высокие коэффициенты корреляции, $R = 0,66–0,91$, для реки Кафирниган со снегово-ледниковым типом питания получились на период с апреля по сентябрь, для реки Гунт с ледниково-снеговым типом питания – на июнь-сентябрь (таблицы 1 и 2).

Для реки Кафирниган наиболее высокие коэффициенты корреляции ($R = 0,66–0,91$) между средними месячными расходами воды получились со снежным покровом двух высотных зон 2400–2900 и 2900–3400 м н.у.м.

Для реки Гунт наиболее высокие коэффициенты корреляции между средними месячными расходами воды за июнь оказались со снежным покровом высотных зон 4070–4570 и 4570–5070 ($R = 0,68–0,71$), за сентябрь – со снежным покровом высотных зон от 2570 до 4070 ($R = 0,70–0,78$). Теснота зависимости средних месячных расходов воды за июль со снежным покровом высотных зон от 4070 до 5570 м составила 0,80–0,87. Коэффициенты корреляции стока за август были низкими и составили всего 0,56–0,58.

Таким образом, для прогноза водности рек на месяцы вегетации можно предложить уравнения линейной зависимости с аргументом SCI по высотным зонам (таблица 3).

Закключение. Индекс SCI – индекс снежного покрова – можно использовать для достоверного и надежного прогноза стока горных рек на месяцы половодья.

Наиболее тесные зависимости на месяцы половодья с апреля по сентябрь с индексом SCI ($R = 0,70–0,87$) получились для рек снегово-ледникового питания. Для рек ледниково-снегового питания наиболее тесные корреляционные зависимости ($R = 0,68–0,87$) получились на месяцы половодья июнь, июль и сентябрь.

Предложенные уравнения зависимости средних месячных расходов воды за период половодья с индексом снежного покрова (SCI) можно использовать для оценки водности и прогноза стока рек в целях предупреждения экстремальной водности рек Памиро-Алая, таких как наводнения и гидрологические засухи.

Литература

1. Лим В.В. Инженерно-геологическая карта условий развития экзогенных геологических процессов в Таджикской ССР / В.В. Лим и др. / Фонды Главного управления геологии при Правительстве Республики Таджикистан. 1984.
2. Перов В.Ф. Исследование селей / В.Ф. Перов. М.: МГУ, 2012. 271 с.
3. Тукеев О.В. Природные ресурсы Таджикской ССР. Сели / О.В. Тукеев, Ю.С. Усков. М.: ГУГК СССР, 1984. С. 7.

4. *Gafurov A.* Cloud removal methodology from MODIS snow cover products / A. Gafurov, A. Bárdossy // Hydrology and Earth System Sciences. 2009. P. 1361–1373.
5. *Gafurov A.* MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data / A. Gafurov, S. Lüttke, K. Unger-Shayesteh, S. Vorogushyn, T. Schöne, S. Schmidt, O. Kalashnikova and B. Merz // Environmental Earth Science. 2016, 75:1078.
6. *Rango A.* Seasonal streamflow estimation in the Hymalayan region employing meteorological satellite snow cover observations / A. Rango, V. Salomonson and J. Foster // Journal of Water Resources Research. 1977. Vol. 13. No. 1.
7. *Калашникова О.* Использование наземных и спутниковых данных о снежном покрове для прогноза стока реки Нарын / О. Калашникова, А. Гафуров // Журнал лед и снег / Институт географии РАН. Русское географическое общество. Том 57. № 4. М.: Наука, 2017 (Scopus ISSN – 2076-6734, on-line ISSN – 2412-3765) DOI: <http://dx.doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-507-517>
8. *Ниязов Дж.Б.* Влияние метеопараметров на сток и прогноз половодья на реке Гунт (приток реки Пяндж, бассейн реки Амударья, Таджикистан) / Дж.Б. Ниязов, О.Ю. Калашникова, С.О. Мирзохонова, Х.Д. Наврузшоев // Матер. межд. научн. конф., посв. 15-летию со дня образования ЦАИИЗ. Дистанционные и наземные исследования в Центральной Азии. Бишкек, Кыргызстан, 17–18 сентября 2019. С. 178–186.
9. *Гафуров А.* Оценка водных ресурсов в Центральной Азии методами дистанционного зондирования. Глава II/87. РАН ФБНУ Всероссийский НИИ агрохимии / А. Гафуров, А., Нурбаcina О. Калашникова // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Том 2. Изучение и мониторинг процессов в почвах и водных объектах: монография. М., 2018. DOI: 10.25680/9340.2018.70.35.184 <http://vniia-pr/monografii/pdf/tom2-87.pdf> ISBN 978-5-9238-0248-1
10. *Шульц В.Л.* Реки Средней Азии / В.Л. Шульц. Л.: САНИГМИ. Изд. ГИМИЗ, 1965. С. 169–173.
11. Атлас Таджикской ССР. АНТССР. Душанбе–Москва: ГУГик, 1968.
12. Данные фондов Таджгидромета.
13. *Hall D.K.* MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid / D.K. Hall, V.V. Salomonson and G.A. Riggs. Version 5. 2006. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <http://dx.doi.org/10.5067/63NQASRDPDB0>.
14. *Hall D.K.* MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6. / D.K. Hall and G.A. Riggs. 2016. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.006>.
15. *Подрезов О.А.* Методы статистической обработки и анализа гидрометеорологических наблюдений. Часть 1 / О.А. Подрезов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2003. 262 с.