

Калашишникова О.Ю., Гафуров А.А., Оморова Э.А.

**НАРЫН ДАРЫЯСЫНЫН СУУСУНУН МОЛДУУЛУГУН
ВЕГЕТАЦИЯ АЙЛАРЫНДА MODIS КОСМОСҮРӨТТӨРҮНҮН
НЕГИЗИНДЕ БОЖОМОЛДОО**

Калашишникова О.Ю., Гафуров А.А., Оморова Э.А.

**ПРОГНОЗ ВОДНОСТИ РЕКИ НАРЫН НА МЕСЯЦЫ
ВЕГЕТАЦИИ НА ОСНОВЕ СНИМКОВ MODIS**

O.Yu. Kalashnikova, A.A. Gafurov, E.A. Omorova

**MODIS SNOW COVER FOR THE FORECASTING
WATER AVAILABILITY ON THE HIGH WATER SEASON
OF THE NARYN RIVER**

УДК: 551.48 + 551.5 + 551.32

Нарын дарыясынын суусунун молдуулугун вегетация айларына карата сапаттуу жана ишенимдүү божомолу мамлекеттер ортосунда транс чек аралык сууну бөлүштүрүү зарыл милдеттерди чечүү учун гана эмес, ошондой эле суу ташкындары жана гидрологиялык кургакчыл менен байланышкан өзгөчө кырдаалдарды алдын алуу үчүн да керек. Макалада гидрологиялык божомолдоо үчүн MODIS космосүрөттөрүнүн мүмкүнчүлүктөрүнүн анализдери жүргүзүлгөн. Дарыянын бассейнинде кар көп каптоолордун узактыгын жана аянтын (кардын катмарынын индекси) эске алган индекс киргизилген. Кар каптоонун индексинин жана орто айлык суу чыгымдарынын байланыш эсептөөлөрү Нарын ш. жана Уч-Терек а. (Токтогул суу сактагычынын негизги агымы) створлору үчүн берилген. Эң мыкты натыйжалар кар эриген айлар үчүн алынды (июнь-сентябрь), анда корреляция коэффициенти 0,70-0,80 түзгөн. Натыйжада Нарын дарыясы үчүн божомолдук тендеме алынды жана Борбордук Азия өлкөлөрүнүн Улуттук Гидрометеокызматтарында практикасында пайдаланылышы мүмкүн. Сунушталган тендеме боюнча 2001-2018-жж. мезгилдери үчүн гидрологиялык божомолдоолор 41-88% түздү.

Негизги сөздөр: суу ресурстары, суунун божомолу, MODIS космосүрөттөрү, кар катмарынын, Нарын дарыясы, Сырдарыянын алабы, Тянь-Шань, Кыргызстан.

Качественный и надежный прогноз водности реки Нарын на месяцы вегетации необходим не только для решения задач вододелиения между трансграничными государствами, но и для предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с наводнениями и гидрологическими засухами. В статье был проведен анализ возможности использования снимков MODIS для гидрологического прогнозирования. Для оценки снеготаяния в бассейне реки был введен индекс, учитывающий продолжительность и площадь снежного покрова (индекс снежного покрова). Расчеты зависимости индекса снежного покрова и средних месячных расходов воды был проведен для створов г.Нарын и с.Уч-Терек (основного притока в Токтогульское водохранилище). Наилучшие результаты были получены для месяцев

снеготаяния (июнь-сентябрь), где коэффициент корреляции составил (R) 0,70-0,80. В результате для реки Нарын были получены прогностические уравнения, которые могут быть использованы в практике Национальных Гидрометслужб Центральной Азии, оправдываемость гидрологических прогнозов по предложенным уравнениям за период 2001 по 2018гг. составила 41-88%.

Ключевые слова: водные ресурсы, прогноз водности, снимки MODIS, снежный покров, река Нарын, река Сырдарья, Тянь-Шань, Кыргызстан.

A high-quality and reliable forecast of the water content of the Naryn river for the growing season is necessary not only to solve the problems of water allocation between cross-border States, but also to prevent emergencies related to floods and hydrological droughts. The article analyzes the possibility of using MODIS images for hydrological forecasting. To assess snow reserves in the river basin, an index was introduced that takes into account the duration and area of snow cover (snow cover index). Calculations of the tightness of the dependence of the snow cover index and the average monthly water consumption were carried out for the Naryn and Uch-Terek rivers (the main tributary to the Toktogul reservoir). The best results were obtained for the snowmelt months (june - september), where the correlation coefficient was (R) 0.70-0.80. As a result, predictive equations were obtained for the Naryn river, which can be used in the practice of the National hydrometeorological Services of Central Asia, and the validity of hydrological forecasts based on the proposed equations for the period 2001-2018. it was 41-88%.

Key words: water resources, forecast of discharge, MODIS images, snow cover, Naryn River, Syrdarya River, Tian-Shan mountain, Kyrgyzstan.

Введение. Река Нарын являясь трансграничной, имеет важное значение для вододелиения четырех государств: Кыргызстана, Узбекистана, Таджикистана и Казахстана. В зимний период сток реки Нарын используется для выработки гидроэлектроэнергии многочисленными каскадами ГЭС, в весенне-летний пе-

риод вода крупнейшего в Кыргызстане Токтогульского водохранилища, используется для орошения сельскохозяйственных земель.

Планомерное использование водных ресурсов реки Нарын и рациональное ведение водного хозяйства при сильно меняющейся из года в год водоносности требует наличия надежной гидрометеорологической информации и прогнозов.

В основе методик долгосрочного прогноза водности реки Нарын лежат физико-статистические методы, учитывающие накопление сезонных запасов снега в горах, предшествующий сток реки и текущую температуру воздуха [1, 2]. В качестве основного аргумента для прогноза водности на месяцы вегетации используются данные метеостанций о накоплении осадков с октября по текущую декаду выпуска прогнозов.

С появлением спутниковой информации в реальном масштабе времени, находящейся в свободном доступе в интернете, началась разработка новых методов на основе информации о снежном покрове с ИСЗ. Впервые возможность использования данных снежного покрова спутниковой информации для прогноза стока рек была доказана А. Ранго в 1977 году [3]. В настоящее время широко используется информация о снежном покрове спутниковых снимков NOAA, Landsat, а также MODIS. Разработка алгоритмов по удалению облачного покрова и получение ежедневных данных о снежном покрове значительно упрощает получение качественной и надежной информации о запасах снега в горных бассейнах рек [4]. Создание программы MODSNOW-Tool, которая поз-

воляет в автоматическом режиме скачивать спутниковые снимки MODIS и удалять с них облачный покров, а также внедрение ее в систему национальных гидрометслужб Центральной Азии, делает доступной получение ежедневной информации о динамике снежного покрова [5].

Авторы статьи использовали опыт успешного использования данных о снежном покрове, обработанных в программе MODSNOW-Tool для прогноза стока реки Нарын на вегетационный период [6], а также инновационные методы прогноза стока рек Центральной Азии на месяцы вегетации [7].

Разработка методики и уравнений для прогноза водности реки Нарын в створе с. Уч-Терек и г. Нарын на месяцы вегетации на основе данных снежного покрова спутниковых снимков MODIS является целью настоящей работы.

Объект исследования и данные. Бассейн реки Нарын относится к Тянь-Шанской горной системе, расположен на территории Кыргызстана, Центральная Азия (73°E-79°E; 40°N-43°N) (рис. 1).

Река Нарын является крупнейшим притоком р. Сыр-Дарья, длина реки до исследуемого створа с. Уч-Терек составляет 560 км, площадь бассейна 47 тыс. км², диапазон высот от 909 до 5133 м. н.у.м. (рис. 1). Кроме того, в нашем исследовании мы рассматриваем бассейн реки Нарын до гидропоста г. Нарын, длина реки составляет 190 км, площадь бассейна – 10,5 тыс. км², диапазон высот от 1974 до 5133 м.н.у.м. (рис. 1). Среднегодовой расход воды в створе с. Уч-Терек за период наблюдений с 1964 по 2017 гг. составляет 347 м³/с, створе г. Нарын – за период наблюдений с 1940 по 2017 гг. составляет 92,9 м³/с [8].

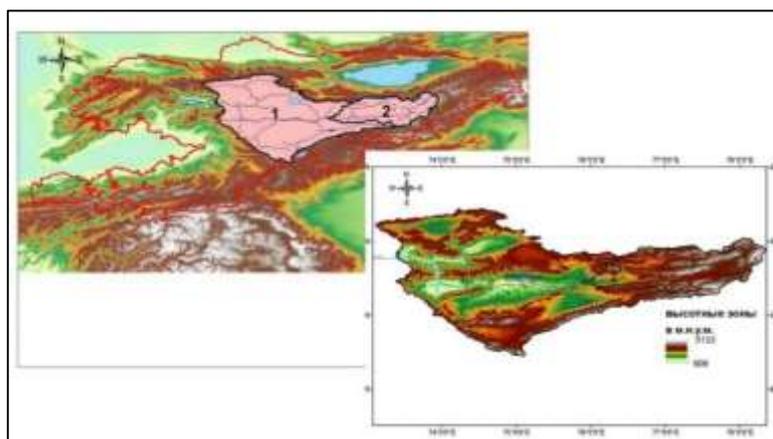


Рис. 1. Расположение бассейна реки Нарын на территории Кыргызстана. 1 - бассейн реки Нарын до гидропоста с. Уч-Терек, 2 – бассейн реки Нарын до гидропоста г. Нарын.

В статье были использованы данные о среднемесячных расходах воды фондов Кыргызгидромета.

Для оценки запасов снега за холодный период времени были использованы снимки MODIS. Spectroradiometer (MODIS) с умеренным разрешением (MOD 10A1 - Terra, MYD10A1 - Aqua, версия 5 и 6), данные снежного покрова MODIS имеют пространственное разрешение 500 метров. Эти данные доступны с 2000 по 2002 год, со спутников Terra и Aqua и выпускаются на весь земной шар [9].

Методы исследования. Река Нарын в створе с.Уч-Терек имеет снегово-ледниковое питание, в створе – г.Нарын – ледниково-снеговое. В период с

апреля по июнь сток реки Нарын формируется за счет талых вод сезонного снега, с июля по сентябрь – за счет талых ледниковых вод [10]. Таким образом, основным аргументом при составлении прогностических методик является информация о снежном покрове.

Мы использовали данные снежного покрова снимков MODIS, обработанных в программе MOD SNOW-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 (рис. 2).

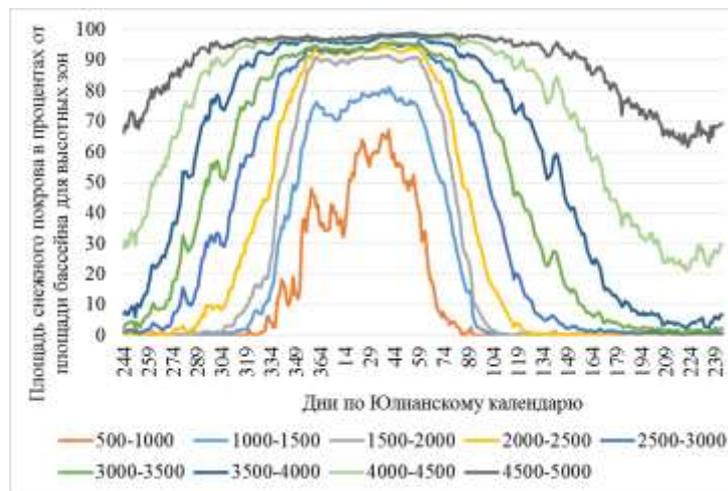


Рис. 2. Динамика площади снежного покрова (SCA) в процентах от площади бассейна по высотным зонам (пример бассейн р.Нарын – с.Уч-Терек).

Для получения информации о продолжительности накопления снежного покрова был введен индекс SCI (snow cover index), позволяющий оценить общее число дней со снежным покровом [7]. Общая формула для расчета индекса SCI для всего гидрологического года имеет вид:

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

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, а также для получения прогностических уравнений был использован метод линейной регрессии [10].

Результаты исследования. Наиболее высокие коэффициенты корреляции средних месячных расходов воды с индексом SCI, $R = 0,70-0,80$, для реки Нарын в створе с.Уч-Терек были в месяцы июнь, июль,

август и сентябрь, в створе г.Нарын – в июне и июле. В апреле и мае для обоих створов и в августе и сентябре для створа г.Нарын коэффициенты корреляции были ниже, $R = 0,50-0,64$ (табл. 1 и 2). Наибольшие коэффициенты корреляции средних месячных расходов воды с индексом SCI были с высотными зонами 3000-4500 м.н.у.м., на сентябрь – 4500-5000, на май – 500-1000 м.н.у.м. (в створе с.Уч-Терек). В апреле и мае на сток реки Нарын большое влияние оказывают дожди, которые накладываются на снеготалый сток, в связи с чем, зависимости с индексом снежного покрова имеют низкий коэффициент корреляции. В месяцы с июня по сентябрь сток реки формируется в основном за счет таяния снега и ледников. Коэффициент корреляции за месяцы август и сентябрь ниже в верховьях р.Нарын, т.к. сток в большей степени зависит от температуры воздуха, определяющей интенсивность таяния ледников.

Таблица 1

Результаты расчетов коэффициентов корреляции средних месячных расходов воды реки Нарын – с.Уч-Терек и индекса SCI по высотным зонам

месяцы	Высотные зоны								
	500-1000	1000-1500	1500-2000	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	4000-4500	4500-5000
Апрель	0,12	0,22	0,18	0,15	0,15	0,30	0,49	0,59	0,63
Май	0,50	0,44	0,31	0,26	0,25	0,30	0,36	0,35	0,25
Июнь	0,26	0,45	0,46	0,45	0,58	0,71	0,79	0,73	0,62
Июль	0,16	0,39	0,45	0,49	0,57	0,70	0,79	0,74	0,60
Август	0,25	0,37	0,37	0,35	0,40	0,51	0,70	0,76	0,68
Сентябрь	-0,03	0,20	0,25	0,29	0,42	0,60	0,74	0,80	0,78

Таблица 2

Результаты расчетов коэффициентов корреляции средних месячных расходов воды реки Нарын – г.Нарын и индекса SCI по высотным зонам

месяцы	Высотные зоны					
	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	4000-4500	4500-5000
Апрель	0,01	0,09	0,24	0,34	0,51	0,56
Май	0,41	0,53	0,58	0,63	0,61	0,48
Июнь	0,36	0,59	0,72	0,80	0,77	0,67
Июль	0,41	0,57	0,57	0,70	0,71	0,55
Август	0,36	0,42	0,48	0,59	0,64	0,58
Сентябрь	0,07	0,24	0,34	0,38	0,50	0,59

Анализ наилучших результатов тесноты зависимости средних месячных расходов воды и индекса SCI по высотным зонам позволяет составить уравнения линейной зависимости для прогноза водности рек (табл. 3). Оправдываемость прогнозов водности реки Нарын по гидропосту с.Уч-Терек за период 2000-2017

гг. составила 41-88%. Наиболее низкая оправдываемость оказалась за апрель и май – 41-47%, наиболее высокая в период июнь – сентябрь – 71-88%. Оправдываемость прогнозов водности реки Нарын по гидропосту г.Нарын за период 2000-2017 гг. составила 53-76%.

Таблица 3

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

Месяцы	Высотная зона	Уравнения	Коэффициент корреляции (R)	Оправдываемость за 2000-2017гг.
Для гидропоста с. Уч-Терек				
Апрель	4000-4500	$234.22SCI_{9-3} + 172.01$	0,59	47
Май	500-1000	$385.09SCI_{9-4} + 445.55$	0,50	41
Июнь	3500-4000	$843.5SCI_{9-5} + 393.73$	0,79	82
Июль	3500-4000	$615.4SCI_{9-6} + 389.1$	0,79	82
Август	4000-4500	$368.36SCI_{9-7} + 318.24$	0,76	71
Сентябрь	4000-4500	$162.86SCI_{9-8} + 241.33$	0,80	88

Для гидропоста г. Нарын				
Апрель	4500-5000	39.641SCI ₉₋₃ + 40.335	0,56	59
Май	3500-4000	94.987SCI ₉₋₄ + 86.544	0,63	71
Июнь	3500-4000	284.87SCI ₉₋₅ + 84.356	0,80	59
Июль	4000-4500	156.9SCI ₉₋₆ + 149.99	0,71	76
Август	4000-4500	109.08SCI ₉₋₇ + 147.22	0,64	53
Сентябрь	4500-5000	35.471 SCI ₉₋₈ + 87.654	0,59	65

Проверочные прогнозы по независимому 2018 году показали хорошую оправдываемость прогнозов. По створам с.Уч-Терек и г.Нарын, все прогнозы оправдались за исключением прогнозов расхода воды на май, по створу с.Уч-Терек – на сентябрь.

Заключение. Наиболее тесные зависимости средних месячных расходов воды с индексом SCI для высотных зон 3000-5000 м.н.у.м, R=0,70-0,80, для реки Нарын в створе с.Уч-Терек были в месяцы июнь, июль, август и сентябрь, в створе г.Нарын – в июне и июле. В апреле и мае для обоих створов и в августе и сентябре для створа г.Нарын коэффициенты корреляции был ниже, R=0,50-0,64. Оправдываемость прогнозов водности реки Нарын по гидропосту с.Уч-Терек за период 2000-2017гг. составила 41-88%, по гидропосту г.Нарын – 53-76%.

Проверочные прогнозы за 2018г. показали, что прогнозы водности на месяцы вегетации, составленные по предложенным в статье уравнениям зависимости средних месячных расходов воды с индексом снежного покрова (SCI), имеют хорошую оправдываемость (75%).

Индекс SCI, индекс снежного покрова, можно использовать для составления методик с достоверным прогнозом стока горных рек на месяцы вегетации.

Благодарность:

Эта работа была проведена при поддержке проекта CAWa (Central Asian Water) (www.cawa-project.net, контракт нет. AA7090002), финансируемым федеральным Министерством иностранных дел Германии в рамках 343-й германской водной инициативы для Центральной Азии («Берлинский процесс»).

Литература:

1. Калашникова О.Ю. К вопросу о гидрологических прогнозах горных рек на весенне-летний период. / Метеорология и гидрология в Кыргызстане. - Бишкек, 2003.
2. Карамолдоев Ж.Ж., Калашникова О.Ю. Прогноз притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период. / Вестник БГУ. - 2012. - Том 3 (23).
3. Rango A., Salomonson V. and Foster J.: Seasonal streamflow estimation in the Hymalayan region employing meteorological satellite snow cover observations, Journal of Water Resources Research, 1977. Vol. 13, No. 1.
4. Gafurov A., Bárdossy A. Cloud removal methodology from MODIS snow cover products. Hydrology and Earth System Sciences, 2009.
5. Gafurov A., Lüdtke S., Unger-Shayesteh K., Vorogushyn S., Schöne T., Schmidt S., Kalashnikova O. and Merz B.: MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data, Environmental Earth Science, 2016.
6. Калашникова О., Гафуров А. Использование наземных и спутниковых данных о снежном покрове для прогноза стока реки Нарын. / Журнал Лед и Снег. 2017. - Том 57 - №4.
7. Гафуров А., Нурбацина А., Калашникова О. Оценка водных ресурсов в Центральной Азии методами дистанционного зондирования. Монография Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. - 2018. - Том 2.
8. Гидрологические ежегодники за 2001-2017гг. Данные фондов Кыргызгидромета.
9. Hall D.K. and G.A. Riggs. 2016. MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
10. Руководство по гидрометеорологическим прогнозам. / Практическое руководство. - Ленинград, 1989.