

БАЛАНСОВАЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАССЕЙНА РЕКИ НАРЫН И МАЛЫХ РЕК, ПИТАЮЩИХ ТОКТОГУЛЬСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Савельев А.А.¹, Токарев И.В.²

*1 – Институт механики и математики им.Н.Г.Чеботарева,
Казанский федеральный университет, Казань.*

2 – Санкт-Петербургское отделение института геоэкологии РАН, Санкт-Петербург.

Введение

Для исследуемого региона неоднократно выполнялись оценки водного баланса в прошлом, например, в связи со строительством Токтогульской гидроэлектростанции (ГЭС) и прогнозом заполнения водохранилища, так и в недавнее в связи с решением о строительстве ГЭС Камбарата-1 и Камбарата-2. Кроме того, изучение водного баланса выполнялось при реализации ряда международных проектов, направленных на обоснование справедливого решения вопроса водodelения в Средней Азии. Количественные результаты этих исследований в ряде случаев были опубликованы, из последних публикаций следует отметить работы (Маматканов и др., 2006; Кузьмиченок, 2008; *Второе...*, 2009).

Гидрологические данные указывают, что второстепенные реки Узун-Ахмат, Чычкан, Торкент и Саргата, замыкающиеся непосредственно на Токтогульское водохранилище, дают относительно малый – около 15 % – вклад в питание водохранилища. Поэтому для оценки динамики внутригодового баланса притока поверхностных вод в водохранилище основное значение имеет гидрологическая модель главной питающей артерии – р. Нарын.

В ходе создания гидрологических моделей, применительно к оценке водного баланса в исследуемом горном регионе, предполагалось решить следующие задачи:

- отработать методику создания и корректировки цифровых моделей рельефа, а также соответствующей аппроксимации исходных данных по увлажнению территории;
- разработать методику калибровки модели, то есть подбора коэффициентов в уравнениях, описывающих водный баланс;
- адаптировать существующие модели стока для их использования при создании уточненных балансовых гидрологических моделей исследуемого региона, а также создать модельную основу для ее включения в качестве компонента в постоянно действующую модель (ПДМ), которую можно было бы использовать при управлении режимом эксплуатации Токтогульского водохранилища.

Анализ метеорологических и гидрологических данных

Атмосферные осадки являются единственным источником формирования водных ресурсов исследуемой территории. Выпадение осадков характеризуется существенной пространственной неоднородностью и, в основном, зависит от высоты местности (Кузьмиченок, 2008). По данным метеостанции «Токтогул» в частном водосборном бассейне Токтогульского водохранилища абсолютный минимум осадков приурочен к августу и сентябрю (Рис. 1).

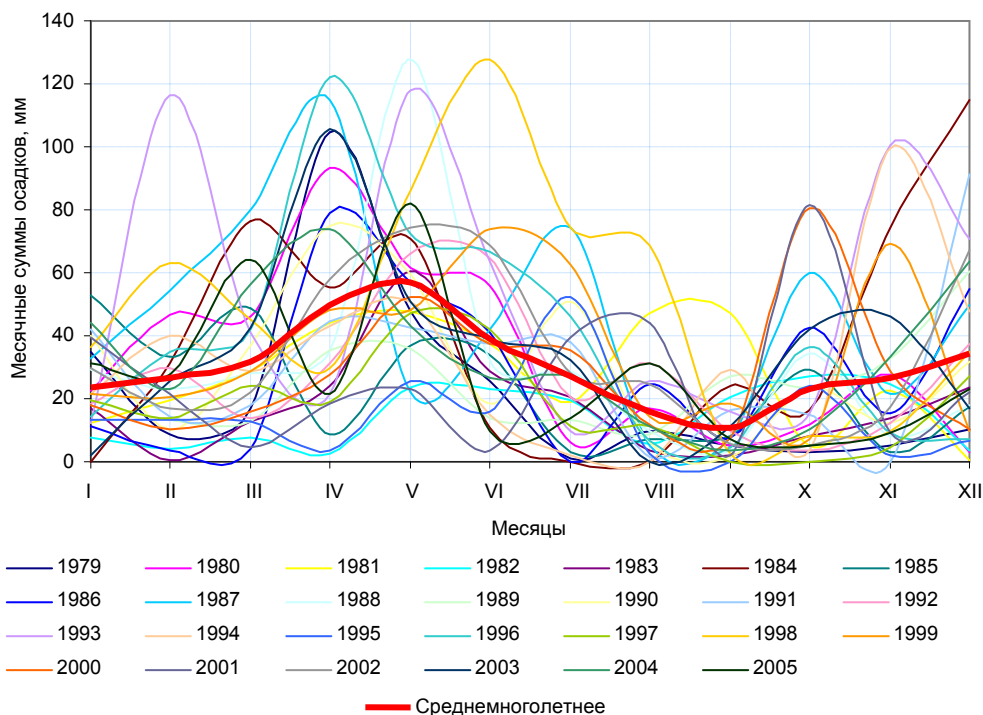


Рис. 1. Графики месячных сумм осадков на метеостанции «Токтогул» за 1979-2005 гг. Условные обозначения: тонкие цветные кривые – месячные суммы осадков за различные годы, которые обозначены в легенде; толстая красная линия – среднемноголетние значения.

Максимальные месячные суммы атмосферных осадков могут появляться в различные сезоны года, однако преимущественно это происходит в апреле-мае-июне (Рис. 2).

Мониторинг атмосферных выпадений за последние 25 лет демонстрирует, что в ходе последнего цикла потепления, начало которого относится к середине 1970-х годов, имел место рост годовых сумм осадков (Рис. 3). Однако в последние годы, возможно, наметилась стабилизация или некоторое снижение годовых сумм осадков. Сравнение Рис. 2 и 3 показывает, что водность года никак не влияет на сроки выпадения максимума осадков (коэффициент парной корреляции между этими величинами $r = -0.035$).

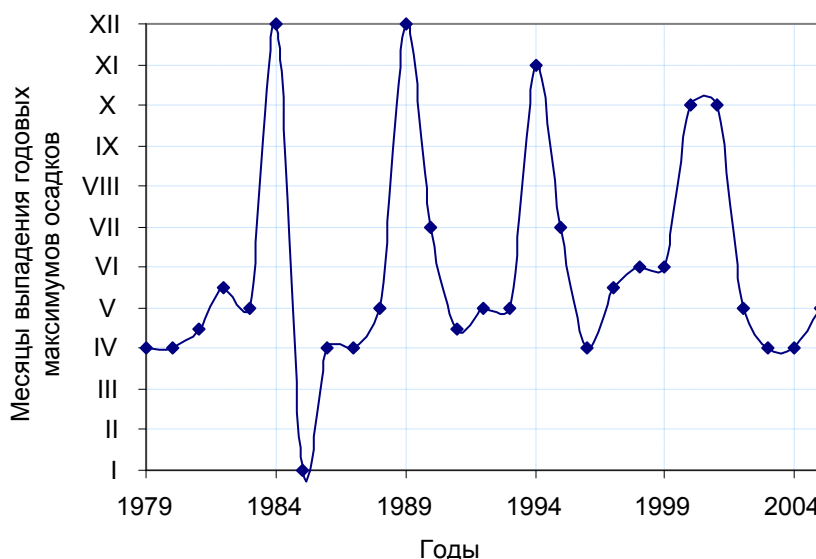


Рис. 2. Графики распределения максимальных месячных сумм осадков по сезонам года на метеостанции «Токтогул» за 1979-2005 гг.

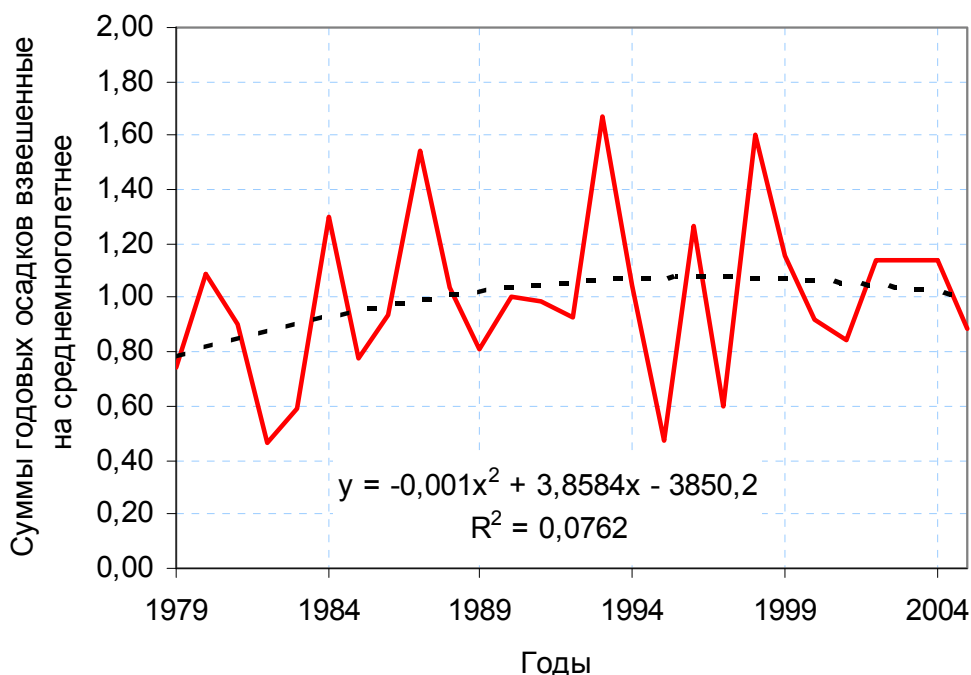


Рис. 3. Графики годовых сумм осадков, отнесенные к среднемноголетней годовой сумме осадков на метеостанции «Токтогул» за 1979-2005 гг.

Температура приземного слоя воздуха является важным параметром, определяющим условия увлажнения территории. График сезонного хода среднемесячных температур по метеостанции «Токтогул» представлен на Рис. 4. Видно, что наибольшим разбросом температур относительно многолетних среднемесячных величин характеризуется январь, февраль и март.

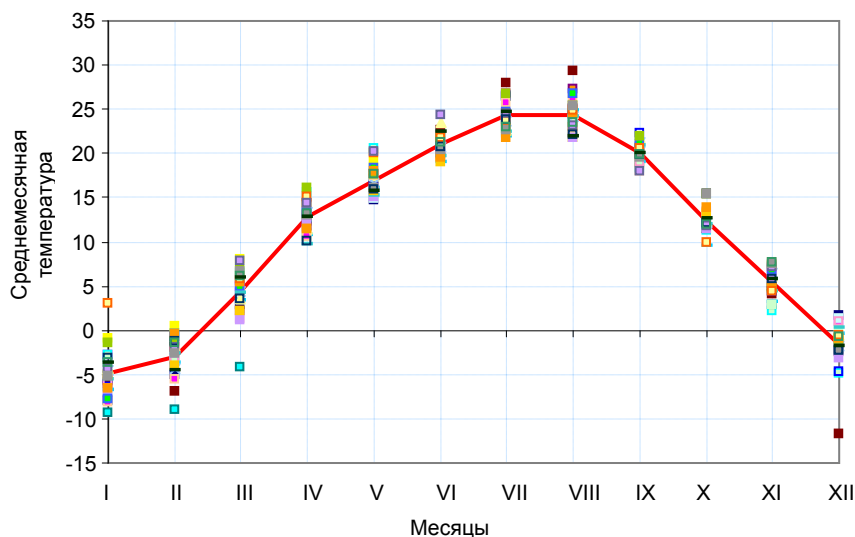


Рис. 4. График многолетних среднемесячных температур приземного слоя воздуха на метеостанции «Токтогул» за 1979-2005 гг. Условные обозначения: цветные квадраты – среднемесячные температуры за различные годы; толстая красная линия – среднемноголетние значения.

Важно отметить, что имеется значимая корреляция между температурой отдельных месяцев и водностью года. Например, для апреля и мая имеет место обратная корреляция $r(t_{\text{АПРЕЛЬ}} - \text{Водность года}) = -0.47$ и $r(t_{\text{МАЙ}} - \text{Водность года}) = -0.48$, а для августа – прямая

$r(t_{\text{АВГУСТ}} - \text{Водность года}) = 0.22$. Первая функциональная зависимость вполне объяснима, так как в холодную весну условия для конденсации атмосферных осадков должны быть благоприятнее, чем в теплую, второе соотношение пока не вполне понятно.

Анализ гидрологических данных позволил сделать следующие выводы о режиме рек, питающих водохранилище. Половодье начинается в конце апреля или начале мае, когда в горах интенсивно тают сезонные снега в среднегорье и, как правило, идут дожди. Годовой максимум стока отмечается в июне месяце. Как предполагалось ранее, до выполнения данного проекта, этот пик связан исключительно с таянием ледников и высокогорных снегов. Иногда, в маловодные годы, на малых реках бывает два половодья, первое имеет место в мае, второе наблюдается в июле.

В соответствии с нормативными документами, которыми руководствуются при гидрологических изысканиях в Кыргызской Республике, основным критерием для идентификации типа питания рек является коэффициент δ . Этот коэффициент вычисляется как отношение стоков за период июль-сентябрь (VII-IX месяцы) к стоку за период март-июнь (III-VI месяцы) (Ресурсы..., 1969; Шульц, 1965). Если $\delta > 1$, то предполагается, что в питании реки имеет место преобладание ледников и «вечных снегов», если $\delta < 1$, то преобладают воды сезонных снегов. На гидропосту «Нарын» (г. Нарын) этот коэффициент $\delta = 1.36$, что теоретически указывает на преобладании воды от ледников и «вечных снегов». На гидропосту «Уч-Терек» – $\delta = 0.91$, то есть предполагается, что питание реки сформировано как ледниковыми, так и водами от таяния сезонных снегов.

Сравнение данных об особенностях горного оледенения в бассейне р. Нарын с гидрологическими характеристиками реки делают практическое применение выше приведенного критерия сомнительным. Действительно, существенную часть территории ледники занимают только в водосборных бассейнах Большого и Малого Нарына. Здесь площадь оледенения составляет около 10 %, на остальной части водосбора р. Нарын доля ледников пренебрежимо мала (Табл. 1). Если предположить, что в створе гидропоста «Нарын», расположенного после слияния рек Большой и Малый Нарын, летний максимум стока обеспечивается преимущественно таянием ледников и «вечных снегов», то запасов воды в них хватило бы на 20-30 лет (см. расчеты в статье Кузьмиченок В.А. «Оледенение и сток в бассейне реки Нарын», настоящий сборник).

Табл. 1.

Основные характеристики оледенения бассейна р.Нарын.

Бассейн	Река	Средневзвешенная высота водосбора, Н, м	Площадь водосбора F, км ²	Площадь оледенения S, км ²	Площадь оледенения, %
Нарын	Бол. Нарын	3720	5710	618.6	10.8
	Мал. Нарын	3500	3870	344.7	8.9
	Ат-Баши	3070	5540	113.7	2.1
	Кёкёмерен	2800	10400	104.7	1.0
	Алабуга	3260	3710	126.7	3.4
	Кёкирим	2410	1720	2.3	0.1
	Нарын на гидропост «Уч-Терек»	2775	47000	1370	2.9
Токтогульское водохранилище	Узун-Ахмат	2360	1790	15.3	0.6
	Чычкан	2740	1150	10.7	0.4

При стационарном положении ледников их таяние полностью компенсируется атмосферными осадками. Поэтому говорить о «ледниковом питании», то есть о существенном вкладе талой ледниковой воды, ведущей к увеличению стока, можно только в случае за счет

деградации ледников (Кузьмиченок, 2008). Достоверно установлено, что начало потепления в данном регионе относится к середине-концу 1970-х годов, то есть к настоящему моменту деградация ледников продолжается уже около 30 лет. Однако, отступление ледников за это время хотя и заметно, но не позволяет говорить об их существенной деградации. Это означает, во-первых, что основное питание р. Нарын обеспечивает все-таки таяние сезонных снегов; во-вторых, по-видимому, существует дополнительный механизм, перераспределяющий сток внутри сезонов года и обеспечивающий существенное запаздывание стока талой снеговой воды.

По-видимому этим механизмом является временное внутригодовое перераспределение водного баланса между поверхностным и подземным стоком. Действительно, по результатам расчленения гидрографа количество ледниковых вод, поступающих в реки бассейна р. Нарын в разные годы, почти одинаково и составляет не более 10 % от годового (*Ресурсы...*, 1969). Основными источниками питания реки являются грунтовые воды – 44 % и снеговой сток составляет 42 %. Доля дождевого стока не превышает 4 %, а доля подруслового стока не превышает 3 %.

Схематизация условий и моделирование

Моделируемая область имеет значительные перепады высот. Например, отметка зеркала водохранилища находится на уровне около 900 м, а водоразделы хребтов в истоках рек Большой и Малый Нарын достигают 4800 м. Поэтому принималось, что вариации температуры, осадков и испарения, являющихся основными факторами, контролирующими сток, определяются только высотой местности. Остальные факторы, такие как ориентация поверхности склонов относительно солнца и их крутизна, направление преобладающих ветров относительно осей хребтов, характер растительности, тип почв и подстилающих пород и т.п. рассматривались как второстепенные.

Методика создания балансовой гидрологической модели бассейна р. Нарын включала следующий анализ данных и вспомогательные построения:

1. Цифровая модель рельефа на водосборную площадь р. Нарын была создана на базе данных дистанционной съемки со спутника The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Эти данные проверялись на предмет ошибок, которые имели характер регулярных возмущений или отдельных выбросов. Корректировка цифровой модели выполнялась в автоматическом режиме с использованием оригинального программного обеспечения.

2. На базе цифровой модели рельефа в автоматическом режиме была выполнена трассировка поверхностных водотоков и водоразделов с последующей ручной проверкой. Балансовая гидрологическая модель поверхностного стока включает также площади, на которых нет постоянных водотоков, однако сток с которых происходит в р. Нарын или в Токтогульское водохранилище.

3. Модельную разбивку территории водосбора р. Нарын на элементарные площадки размером 500×500 м и для бассейнов малых рек – на площадки 250×250 м. Для каждой площадки учитывается абсолютная высота над уровнем моря (гистограммы распределения высот по бассейнам представлены на Рис. 5).

4. Для оценки генеральных характеристик увлажнения использована статистическая модель распределения среднегодовых температур, осадков и испарения по высотам, которая принималась в соответствии с (Кузьмиченок, 2008). На этой основе, а также с использованием метеорологической информации по станциям, расположенным непосредственно в бассейне р. Нарын или вблизи исследуемого региона на разных высотах, конструировался внутригодовой ход температур, осадков и испарения с месячным осреднением. Интерполяция данных о годовом ходе температур, осадков и испарения выполнялась за весь имеющийся в

архивах период наблюдений (например, для р. Нарын это 1963-2006 гг., для р. Узун-Ахмат – 1930-2006 гг., для р. Торкент – 1966-1993 гг.).

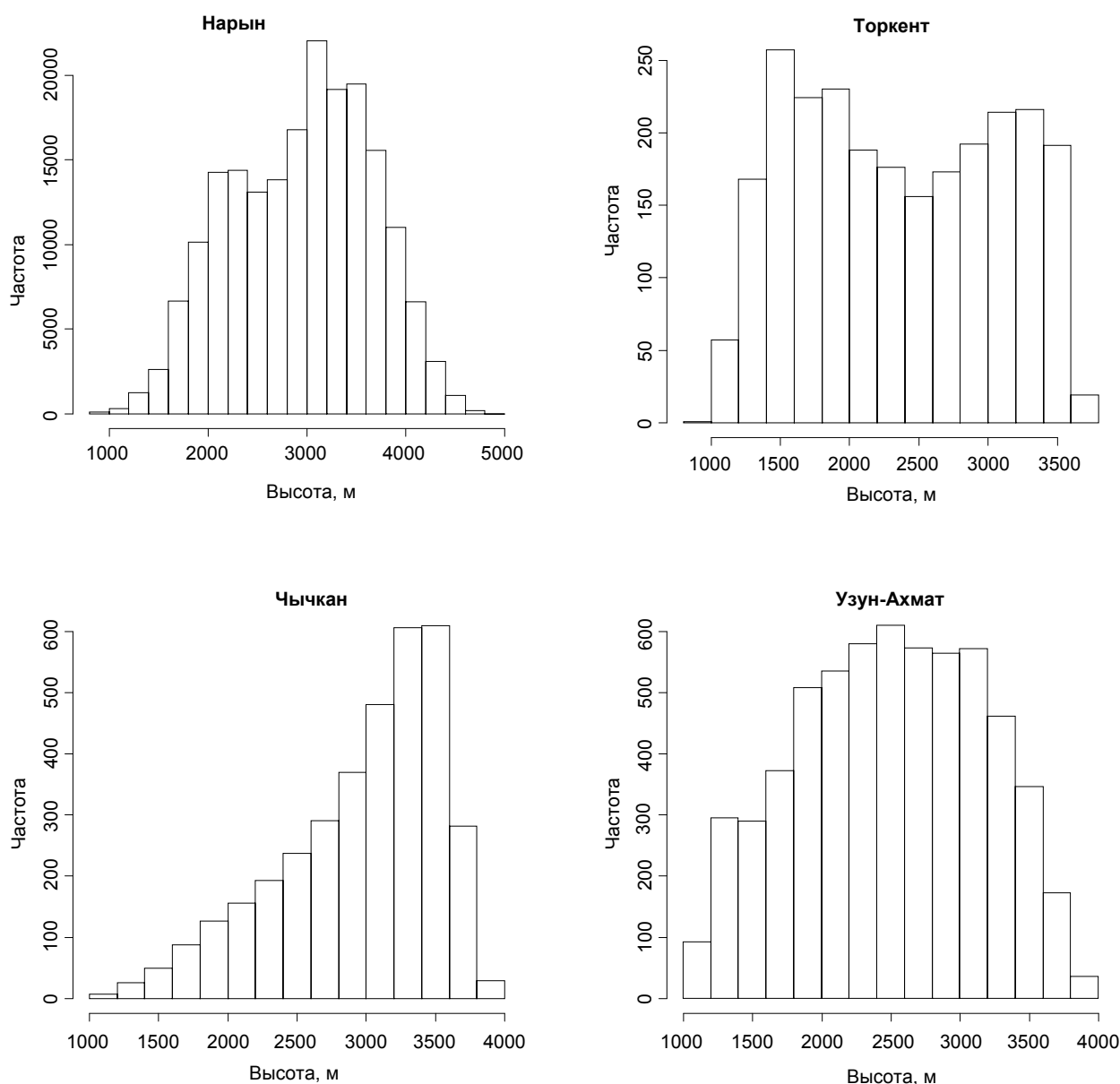


Рис. 5. Гистограммы распределения высот по бассейнам рек Нарын, Торкент, Чычкан и Узун -Ахмат.

Собственно балансовые гидрологические модели бассейна р. Нарын и малых рек были созданы на базе модели расчета поверхностного стока The Snow-melt Run-off Model for Windows (SRM). Математическая формулировка модели представлена на <http://hydrolab.arsusda.gov/cgi-bin/srmhome> <http://www.ars.usda.gov/Services/Services.htm?modecode=12-65-06-00>). Для математической модели на базе свободно распространяемого языка программирования «R» был написан программный код для расчета поверхностного стока.

Математическая формулировка модели SRM имеет вид:

$$Q_{n+1} = [C_{sn} \cdot a_n (T_n + \Delta T_n) \cdot S_n + C_{rn} \cdot P_n] \frac{A \times 10000}{86400} \cdot (1 - k_{n+1}) + Q_n \cdot k_{n+1}$$

где

Q – среднесуточный расход, м³/с;

C – коэффициент стока, вычисляется из отношения сток/осадки, принимая во внимание, что C_{sn} относится к снегу и C_{rn} к дождю;

a – суточный фактор снеготаяния, указывающий глубину протаивания для одного градусо-дня, см/°C/сут;

T – число градусо-дней, °C·сут;

ΔT – скорость прироста суточной температуры, °C·сут;

S – доля территории, покрытой снегом, по отношению к общей площади

P – вклад осадков в сток, см. Переходная (через ноль) температура определяет (TCRIT) момент, когда выпадает снег или дождь;

A – площадь бассейна или зоны, км²;

k – коэффициент рецессии, указывающий на уменьшение расхода при отсутствии жидких осадков или снеготаяния;

n – число дней.

Доля снежного покрова вычисляется как

$$S_{i,j,MO} = \beta_{i,j,MO} + \alpha_{i,j} T_{MO}$$

где

$S_{i,j,MO}$ – доля снежного покрова в j -м поддиапазоне i -го бассейна в месяц MO

$\beta_{i,j,MO}$ – среднее значение доли снежного покрова в j -м поддиапазоне i -го бассейна в месяц MO

$\alpha_{i,j}$ – коэффициент для вычисления поправки доли снежного покрова в зависимости от температуры на метеостанции Нарын.

T_{MO} – среднемесячная температура на метеостанции Нарын в месяц MO .

В качестве первого приближения при построении предложенной модели была использована модель, представленная в проекте, выполненным в Центре космических исследований Академии наук Республики Узбекистан – Muzafar Malikov, «The Importance of Snowmelt Runoff Modeling for Sustainable Development and Disaster Prevention», представленным на международном семинаре под эгидой ООН (United Nations/Islamic Republic of Iran Regional Workshop on the Use of Space Technology for Environmental Security, Disaster Rehabilitation and Sustainable Development). Из представленной модели взяты a – суточный фактор таяния снега и C – коэффициент стока.

В ходе расчетов по модельной базе данных о температуре определяется вид осадков «твердые» (если температура ниже нуля) или «жидкие» (если температура выше нуля) на данной элементарной площадке в данный момент времени. Если температура была отрицательна, то в модели описывается «выпадение» твердых осадков, которые накапливаются на данной элементарной площадке. Если температура положительна, то моделируется «выпадение» жидких осадков, которые немедленно (без учета времени плоскостного стока) переправляются в водотоки.

После наступления положительной температуры воздуха запасы снега в модели начинают убывать за счет «таяния», темпы которого определяются параметрами балансового уравнения, зависящими от фактических метеорологических данных. На основании

фактических данных, а также параметров уравнений, подобранных в ходе решения, балансовая гидрологическая модель рассчитывает сток с водосборного бассейна.

В соответствии с методикой построения модели SRM было принято решение разбить диапазон высот 1000-4000 метров на поддиапазоны с шагом 500 метров (всего 6 поддиапазонов). Высоты, выходящие за эти пределы, были отнесены к крайним поддиапазнам. Распределение (в процентах) высот по поддиапазнам приведено в Табл. 2.

Табл. 2.

Распределение высот (в процентах) по поддиапазнам в бассейне р.Нарын и на водосборах малых рек.

Река	Идентификационный номер бассейна, ID	Поддиапазоны					
		1000-1500 м	1500-2000 м	2000-2500 м	2500-3000 м	3000-3500 м	3500-4000 м
		1	2	3	4	5	6
Узун-Ахмат	1	9.0	17.0	23.5	24.2	20.6	5.8
Чычкан	2	1.6	6.8	12.8	22.3	39.6	16.9
Торкент	5	14.2	23.8	18.2	17.7	22.0	4.0
Нарын	6	1.4	9.6	18.3	19.4	26.1	25.1

Калибровка модели, в частности, в связи с отсутствием качественной сети наблюдений в бассейне р. Нарын, выполнялась по дистанционным данным и наблюдениям на гидропосту «Уч-Терек».

Напоминаем, что основным источником питания рек являются сезонные снега. Поэтому наиболее принципиальным моментом при построении и калибровке моделей было корректное задание темпов снеготаяния. Для калибровки строилась модель доли снежного покрова поверхности бассейнов для каждого поддиапазона в зависимости от температуры по месяцам. В качестве первичных данных были использованы результаты проекта TERRA (прибор MODIS), а именно 8-суточные маски снежного покрова, находящиеся на сайте NASA (<ftp://n4ftl01u.ecs.nasa.gov/MOST/MOD10A2.005>). Данные были переведены в нужную проекцию, пересчитаны на рабочую сетку с шагом 500 метров по вертикали и усреднены по месяцам.

Пример дистанционной основы для расчета доли снежного покрова за 2004 г. для бассейна Токтогульского водохранилища, пересчитанный помесячно, приведен ниже в виде Рис. 6. На этом рисунке цвета означают:

- голубой – 80 % территории и более покрыты снегом,
- белый – 50 % территории имеют снежный покров,
- серо-зеленый – 15 % территории имеют снежный покров,
- горчичный – территория свободна от снега.

Проблему составляет отсутствие современных данных натурных измерений по запасам воды в снеге. Для оценки запасов воды в снеге использовались сведения по водомерным постам, полученные в период 1980-х годов «Кыргызгидрометом».

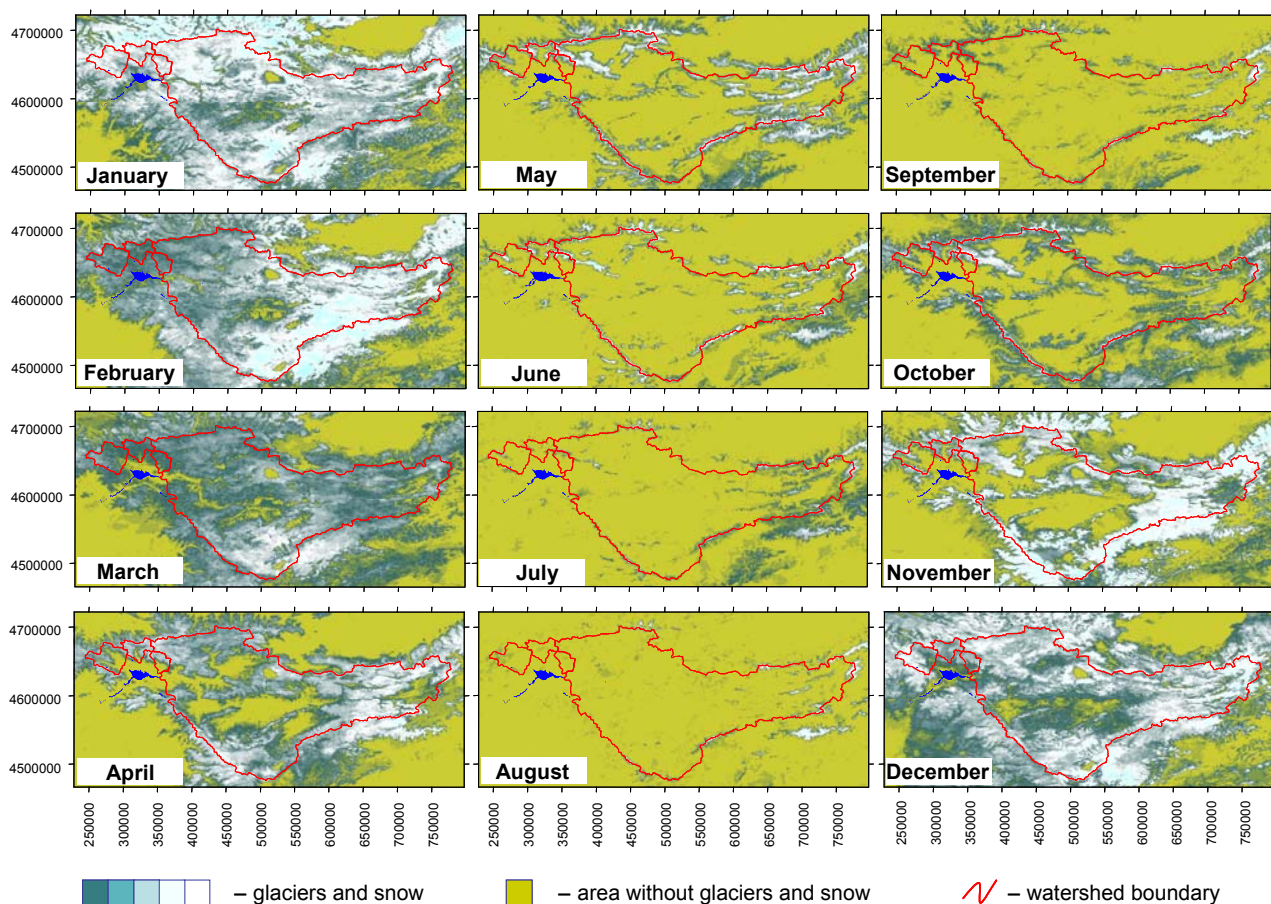


Рис. 6. Пример расчета доли снежного покрова за 2004 г. по данным проекта TERRA (прибор MODIS) по бассейнам рек Нарын, Торкент, Чычкан и Узун-Ахмат.

Таблица данных проекта TERRA (прибор MODIS), использованных для построения моделей SRM, приведена ниже.

Год	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2000	–	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2001	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2002	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2003	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2004	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2005	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2006	+	+	+	+	–	–	–	+	–	–	–	–
2007	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2008	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–

Качество расчета доли снежного покрова оценивалось с использованием квадрата объясненной дисперсии R^2 , гистограмма значений которого по всем моделям приведена на Рис. 7.

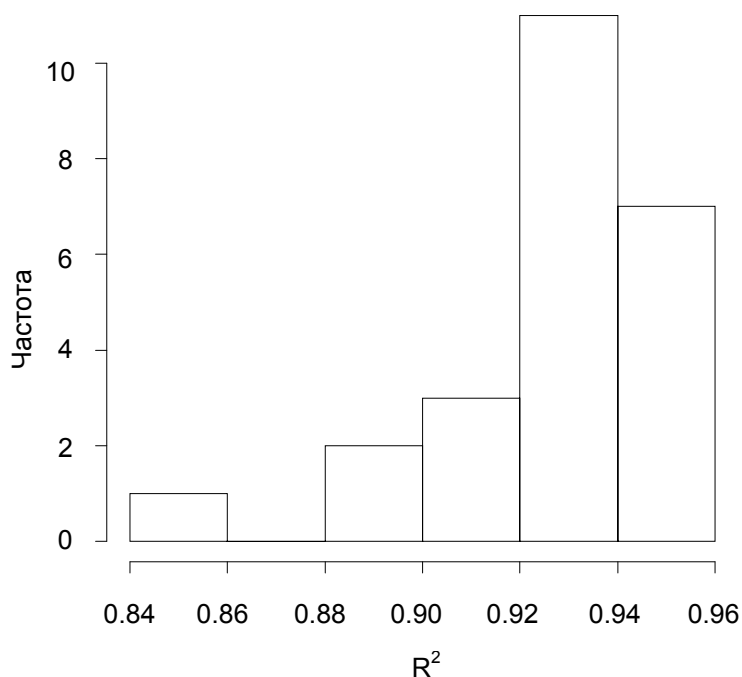


Рис. 7. Гистограмма квадрата объясненной дисперсии для оценки качества расчета доли снежного покрова для балансовых гидрологических моделей по бассейнам рек Нарын, Торкент, Чычкан и Узун -Ахмат.

Наименьшие значения соответствуют первому (1000-1500 м) и последнему (3500-4000 м) поддиапазонам высот, в которые попадает недостаточно много ячеек расчетной сетки и в которые отнесены площади, выходящие за рамки разбивки на высотные поддиапазоны. Приведенный график демонстрирует высокое качество моделей, что позволяет их использовать для прогноза доли территории, имеющей снежный покров, в зависимости от бассейна, поддиапазона высот, месяца и температуры.

Для оценки распределения осадков по поддиапазонам были использованы данные представленные в виде регулярной цифровой модели среднегодовых значений (Кузьмиченок, 2008):

- температуры воздуха,
- суммы атмосферных осадков,
- испаряемости,
- испарения.

Зависимость осадков и испарения от высоты для частного бассейна Токтогульского водохранилища и бассейна р. Нарын представлена на Рис. 8.

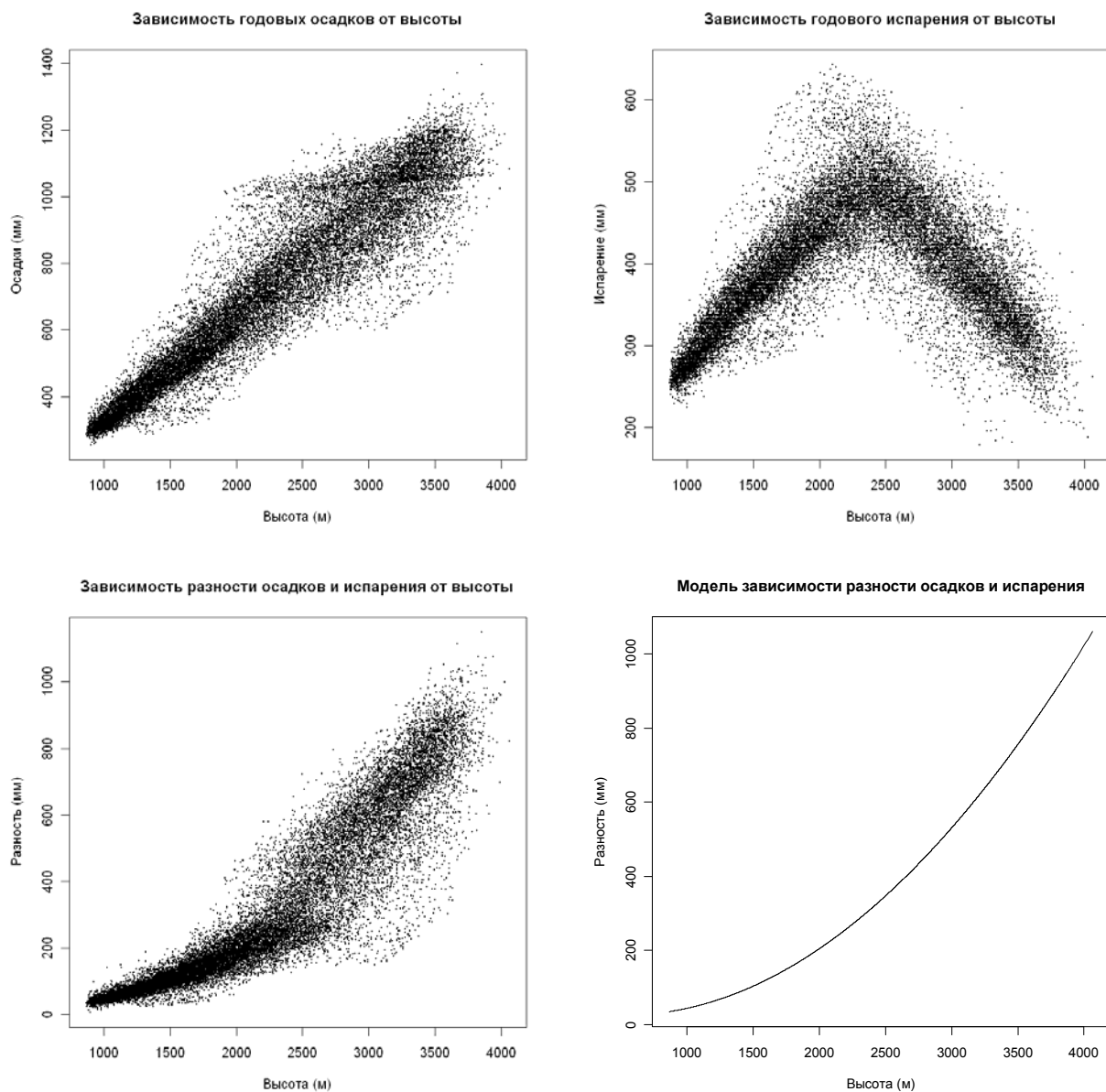


Рис. 8. Распределение осадков и испарения по высотам для бассейна рек Нарын и малым рекам Торкент, Чычкан и Узун-Ахмат.

Полученная модель разности осадков и испарения обоснованно использовалась для перераспределения общего объема осадков по поддиапазонам высот, поскольку модель показывает достаточно высокое качество $R^2 = 0.88$.

После калибровки модели по дистанционным данным была получена собственная таблица коэффициентов балансовых гидрологических моделей (Табл. 3).

Табл. 3.

Коэффициенты в уравнениях водного баланса для бассейна р.Нарын и водосборов малых рек.

Бассейн ID	Поддиапазон Н	Alpha	Beta1	Beta2	Beta3	Beta4	Beta5	Beta6	Beta7	Beta8	Beta9	Beta10	Beta11	Beta12
1	1	-0.012	0.092	0.114	0.094	0.100	0.150	0.194	0.210	0.215	0.163	0.076	0.004	0.027
	2	-0.011	0.170	0.151	0.192	0.099	0.136	0.175	0.188	0.192	0.146	0.071	0.060	0.115
	3	-0.011	0.255	0.191	0.291	0.163	0.143	0.176	0.190	0.195	0.15	0.102	0.178	0.246
	4	-0.010	0.288	0.198	0.326	0.258	0.175	0.169	0.173	0.177	0.146	0.171	0.283	0.310
	5	-0.007	0.313	0.214	0.330	0.301	0.243	0.189	0.130	0.123	0.128	0.253	0.351	0.347
	6	-0.003	0.329	0.230	0.330	0.282	0.285	0.278	0.129	0.094	0.133	0.317	0.384	0.379
2	1	-0.011	0.122	0.126	0.084	0.092	0.140	0.182	0.197	0.202	0.154	0.071	0.000	0.050
	2	-0.011	0.162	0.145	0.160	0.096	0.135	0.176	0.188	0.192	0.146	0.070	0.042	0.087
	3	-0.012	0.208	0.161	0.258	0.176	0.157	0.201	0.216	0.221	0.168	0.106	0.142	0.174
	4	-0.012	0.230	0.166	0.327	0.322	0.211	0.206	0.217	0.222	0.177	0.194	0.272	0.247
	5	-0.010	0.244	0.172	0.329	0.377	0.340	0.256	0.188	0.184	0.18	0.317	0.346	0.279
	6	-0.007	0.260	0.184	0.318	0.362	0.394	0.349	0.175	0.137	0.173	0.373	0.363	0.311
5	1	-0.010	0.195	0.162	0.133	0.083	0.126	0.163	0.176	0.181	0.137	0.063	0.013	0.132
	2	-0.012	0.183	0.161	0.207	0.111	0.147	0.189	0.204	0.21	0.16	0.077	0.066	0.167
	3	-0.011	0.256	0.209	0.296	0.183	0.149	0.185	0.199	0.204	0.159	0.095	0.162	0.261
	4	-0.010	0.283	0.215	0.332	0.313	0.208	0.183	0.176	0.18	0.149	0.165	0.291	0.302
	5	-0.009	0.265	0.195	0.325	0.371	0.365	0.342	0.205	0.164	0.17	0.291	0.351	0.297
	6	-0.008	0.247	0.173	0.305	0.381	0.455	0.533	0.319	0.176	0.213	0.396	0.389	0.283
6	1	-0.016	-0.035	0.047	0.102	0.128	0.192	0.249	0.27	0.277	0.21	0.097	-0.005	0.017
	2	-0.017	-0.036	0.044	0.139	0.145	0.21	0.272	0.295	0.302	0.23	0.106	0.003	0.025
	3	-0.020	0.043	0.105	0.220	0.219	0.25	0.323	0.351	0.359	0.273	0.137	0.064	0.094
	4	-0.018	0.110	0.161	0.290	0.302	0.244	0.294	0.317	0.326	0.251	0.174	0.199	0.191
	5	-0.013	0.183	0.212	0.311	0.344	0.245	0.234	0.236	0.24	0.201	0.235	0.311	0.260
	6	-0.006	0.240	0.254	0.295	0.343	0.282	0.225	0.156	0.147	0.17	0.308	0.398	0.324

Качество балансовых гидрологических моделей проверялось также по гидрологическим данным о стоке рек. Коэффициент рецессии k (Snowmelt... 1998) в модели определяется как линия, соответствующая нижней огибающей точек (Q_n, Q_{n+1}) . Для расчета использовались значения суточных расходов для 1966 года, поскольку другие ежесуточные данные получить не удалось. Хотя обычно для более высоких расходов этот коэффициент имеет несколько меньшие значения, в нашем случае он достаточно хорошо аппроксимируется одним значением (Рис. 9).

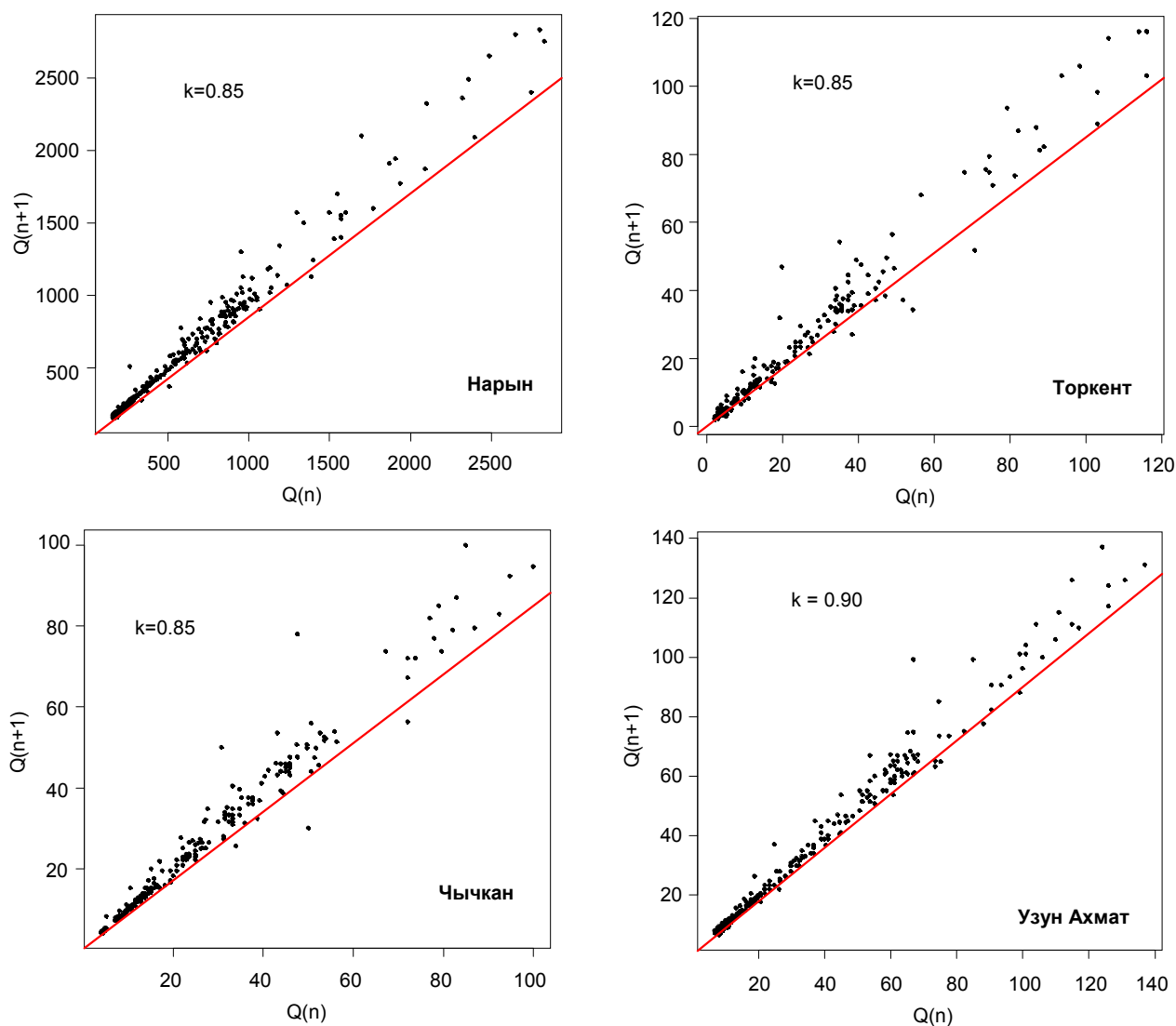


Рис. 9. Коэффициент рецессии для оценки качества балансовых гидрологических моделей по бассейнам рек Нарын, Торкент, Чычкан и Узун Ахмат.

Первоначальный прогноз стока по реке Нарын на гидропосту «Уч-Терек», полученный по модели SRM, представлен на Рис. 10. Поскольку в нашем распоряжении для рек Нарын, Торкент, Чычкан и Узун-Ахмат и для большей части периода наблюдений имелись только среднемесячные данные, то и модельный суточный прогноз был усреднен помесячно.

Модель стока (по месяцам)

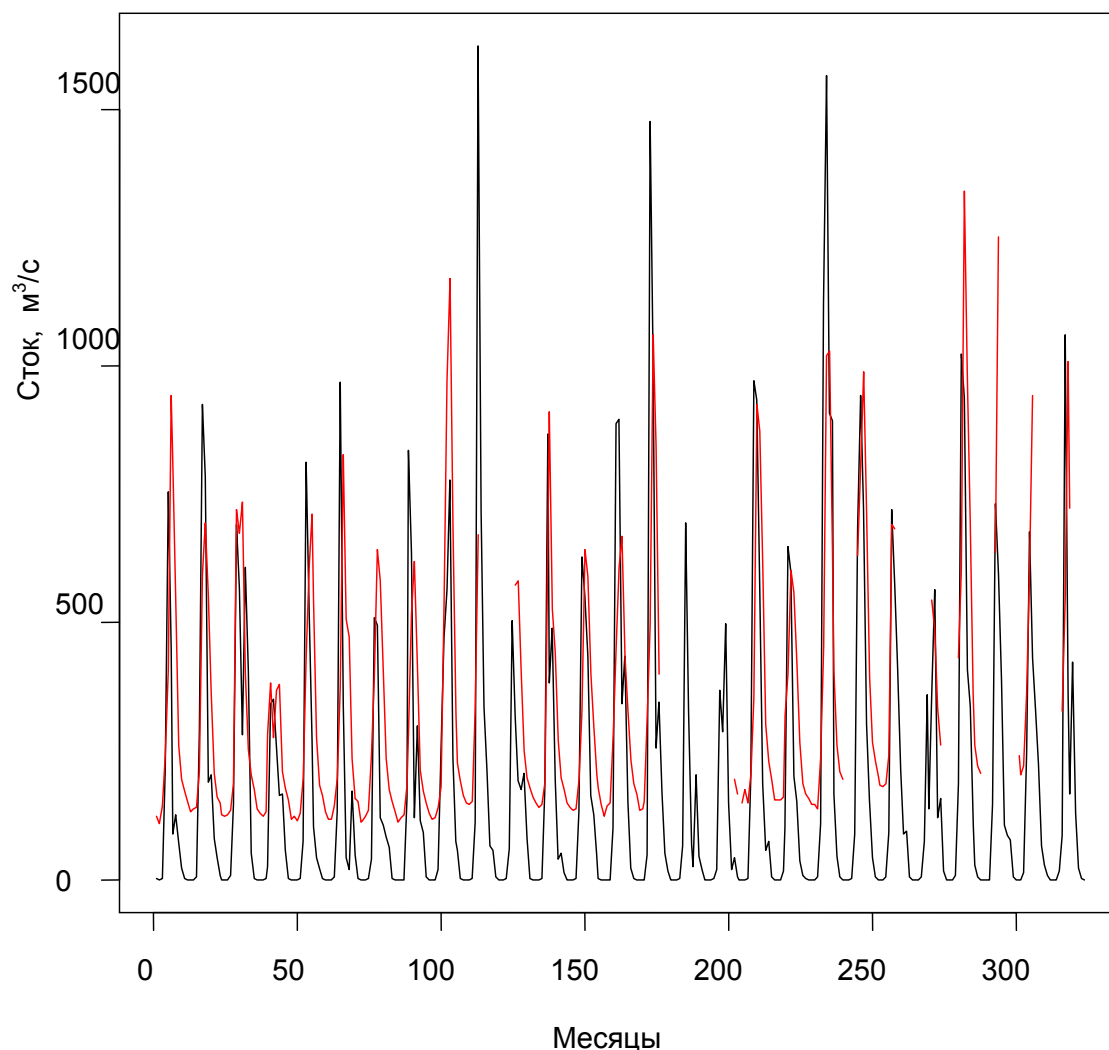


Рис. 10. Первоначальный модельный (черные линии) и фактический (красные линии) среднемесячный сток по реке Нарын на гидропосту «Уч-Терек».

В целом модель плохо соответствует фактическим данным, так как фактический меженный (зимний) сток р. Нарын не опускается ниже $96.9 \text{ м}^3/\text{с}$ (25 % квантиль 150). Напротив, модельный сток принимает практически нулевые значения в периоды времени, которые соответствуют месяцам со средней отрицательной температурой. Напоминаем, что текущие температуры определялись с учетом средней высоты местности и с учетом разбивки по поддиапазнам. В период отсутствия модельного стока попадают зимние месяцы с ноября по март.

Для учета подземного меженного стока, который не включается в модели SRM, был выполнен расчет для варианта с прибавлением к стоку числа $120 \text{ м}^3/\text{с}$. Результаты расчета представлены на Рис. 11.

Модель стока (по месяцам)

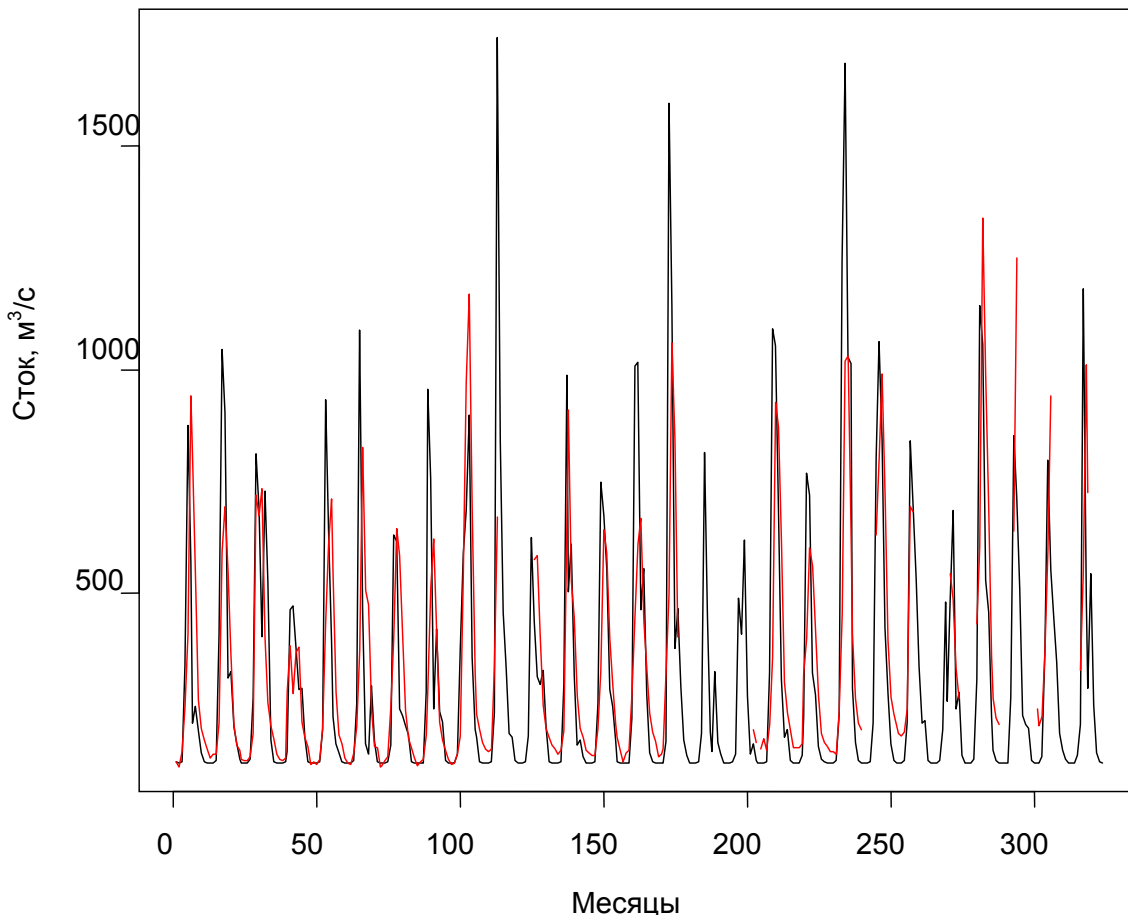


Рис. 11. Модельный (чёрные линии) и фактический (красные линии) среднемесячный сток по реке Нарын на гидропосту «Уч-Терек» с учетом меженного стока в размере 120 м³/с.

При детальном анализе результатов моделирования и фактических данных видны две долговременные особенности режима поверхностного стока:

- 1) увеличение минимального (меженного) стока со временем;
- 2) сдвиг (запаздывание) фактического стока на 1.5-2.0 месяца по отношению к максимуму стока, обусловленному максимуму «снеготаяния» в модели (соответствующего сезонному ходу температур и дистанционным данным проекта TERRA).

Для объяснения причин увеличения минимального зимнего стока со временем была вычислена линейная модель тренда минимального стока. Найдено, что тренд является значимым для периода времени после января 1979 г. Положительный временной тренд имеет значение 0.085/месяц (1.02/год) и статистически обоснован на 1 % уровне значимости. При сопоставлении с литературными данными о ходе потепления в среднеазиатском регионе можно сделать вывод о том, что, вероятнее всего, увеличение минимального стока в зимнюю межень объясняется климатическими вариациями последних двух десятков лет. Физически это увеличение стока вызвано протаиванием грунта на меньшую глубину и более частые зимние оттепели. В целом это создает более благоприятные условия для перевода части снежного покрова в подземный сток с последующей разгрузкой в реки в период с отрицательными среднемесячными температурами.

Анализ результатов моделирования показывает, что наилучшее совпадение модельного решения с реальным стоком по р. Нарын наблюдается тогда, когда параметры (коэффициенты) модели обеспечивают смещение максимального стока в водохранилище примерно на 1.5-2.0 месяца относительно модельного пика таяния снега, обусловленного естественным ходом температур.

Обнаруженная задержка максимума стока в водохранилище по отношению к пику снеготаяния не может быть объяснена добеганием воды по рекам. Скорости течения воды в малых реках обеспечивают время добегания порядка 2-3 суток с учетом движения по основным водотокам и их притокам. Для р. Нарын время руслового не превышает 10 дней.

Можно было бы предположить, что летний пик стока по рекам связан с таянием ледников, однако по дистанционным данным и гляциологическому описанию района ледники в бассейне Токтогульского водохранилища отсутствуют, а в бассейне р. Нарын занимают относительно небольшую площадь (Табл. 1). Следовательно, задержка пика поверхностного стока относительно пика снеготаяния может быть объяснена прохождением талой снежной воды сквозь рыхлые русловые отложения и склоновые отложения, то есть гидрогеологическими условиями территории.

После корректировки коэффициентов модели таким образом, чтобы обеспечивалось время добегания 1.5-2.0 месяца и введения в модель минимального меженного стока в размере $120 \text{ м}^3/\text{с}$, решение для поверхностного стока по р. Нарын для гидропоста «Уч-Терек» принимает вид (Рис. 12).

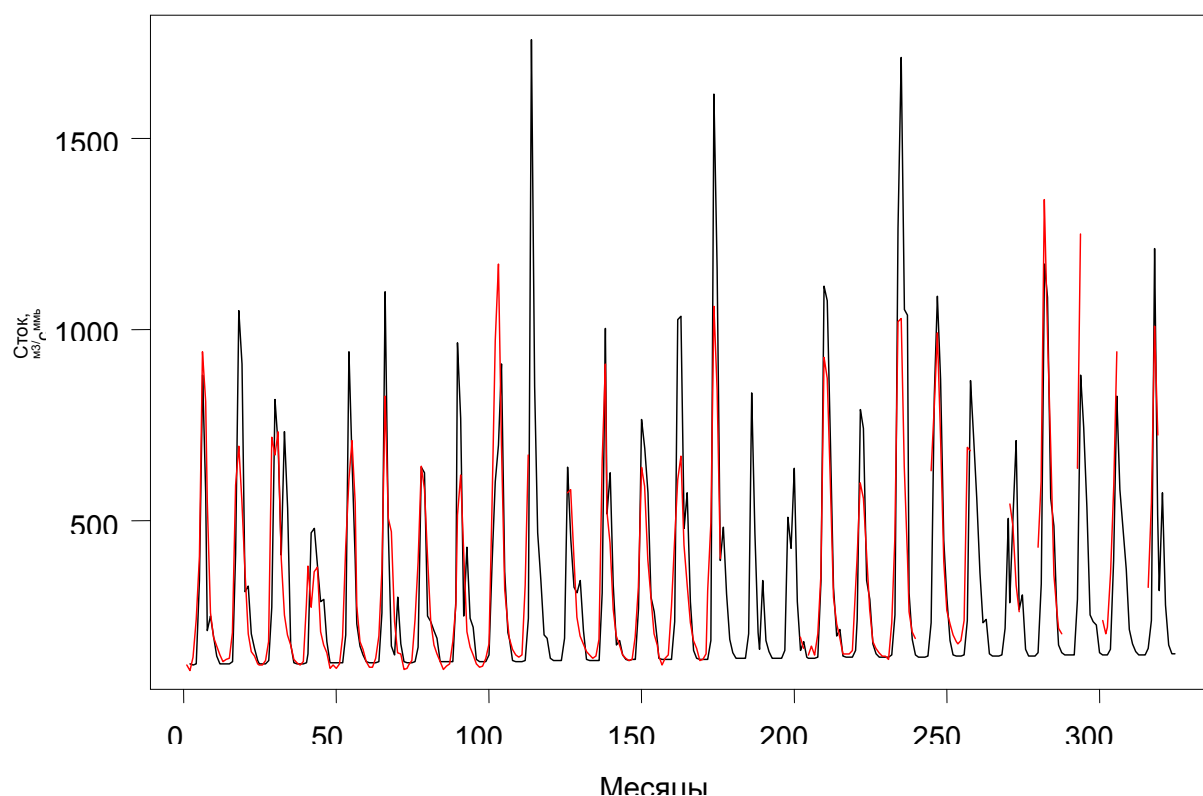


Рис. 12. Модельный (черные линии) и фактический (красные линии) среднемесячный сток по реке Нарын на гидропосту «Уч-Терек» с учетом меженного стока в размере $120 \text{ м}^3/\text{с}$ и корректировки коэффициентов, обеспечивающих задержку стока на 1.5-2 мес. по сравнению с пиком снеготаяния.

Выводы

Таким образом, анализ гидрологических данных и моделирование указывают на следующие особенности водного режима бассейнов р. Нарын и Токтогульского водохранилища:

1. Имеет место подземный сток с водосборной площади по рыхлым подрусловым и склоновым отложениям, который определяет задержку максимума поверхностного стока на 1.5-2.0 месяца по отношению к пику снеготаяния.

2. Подземное питание полностью определяет поверхностный сток в зимнюю межень и, например, для р. Нарын имеет среднемноголетнее значение около $120 \text{ м}^3/\text{с}$.

3. Имеет место статистически значимое увеличение зимнего меженного стока в период после 1979 г. с фактором 1.02 в год, которое определяется общим потеплением климата.

Гидрологическая интерпретация полученных нами модельных воднобалансовых расчетов в совокупности с экспериментальными изотопно-геохимическими [Токарев и др., «Изотопно-геохимические...» настоящий сборник] в значительной степени отличаются от ранее принятых моделей водного питания Токтогульского водохранилища. В частности, оказывается незначительной роль ледникового питания и выявляется ранее не учитываемый вклад подземного стока во внутригодовое перераспределение водного баланса.

Выполненные исследования указывают, что разработанная гидрологическая модель может быть существенно улучшена. Для этого необходимо получение следующей дополнительной информации:

– распределения суточного хода температур и декадного выпадения осадков по высотам 1000-4000 м;

– выполнения наземной оценки влагозапасов в снеге для заверки дистанционных данных;

– непрерывных наблюдений за стоком р. Нарын и малых рек.

При получении означенной информации модель может быть уточнена в степени достаточной для практического использования при расчетах режима эксплуатации Токтогульского водохранилища.

В настоящее время остается пока недостаточно ясным возможность долгосрочного предсказания водного баланса на разработанной модели. Точность прогноза стока зависит от точности данных по атмосферным осадкам в региональных климатических моделях, которые в рамках данного проекта не рассматривались.

Литература

Второе национальное сообщение Кыргызской Республики по рамочной конвенции ООН об изменении климата. Бишкек, “Полиграфоформление”, 2009, 213 с.

Кузьмиченок В.А. Цифровые модели характеристик увлажнения Кыргызстана. (Математико-картографическое моделирование). Бишкек, изд. Кыргызско-Российского славянского университета, 2008, 237 с.

Маматканов Д.М., Бажанова Л.В., Романовский В.В. Водные ресурсы Кыргызстана на современном этапе. Бишкек, “Илим”, 2006, 265 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Монография. Том 14, вып.1. Бассейн р.Сыр-Дарьи. Под ред. Ильина И.А. Л., Гирометеоиздат. 1969. с. 437.

Snowmelt Runoff Model User’s Manual, v. 4, 1998, 86 p.