

Влияние сокращения оледенения на сток рек в Средней Азии

© 2013 г. Г.Е. Глазырин

Национальный университет Узбекистана, Ташкент

gleb.glazirin@gmx.net

Статья принята к печати 19 мая 2013 г.

Водные ресурсы, ледниковый сток, реки Средней Азии, речной сток, сокращение оледенения.
Glacial run-off, river run-off, rivers of Central Asia, shrinkage of glaciers, water resources.

Широко распространено мнение, что современное быстрое сокращение горного оледенения сильно влияет на сток рек. Однако выполненные нами расчёты доли стока, образующегося на среднеазиатских ледниках за счёт таяния сезонного снега и многолетних фирна и льда, показали, что уменьшение площади и объёма ледников мало влияет на годовой сток рек. Основным источником питания рек – атмосферные осадки. Вместе с тем внутригодовое распределение стока связано с сокращением площади оледенения.

Введение

В Средней Азии часть стока рек формируется за счёт ледникового питания. Очевидно, что количество поступающей талой воды непосредственно определяется суммарной площадью ледников в бассейнах, т.е. площадью оледенения. Однако эта площадь в настоящее время быстро сокращается. При рассмотрении влияния ледникового питания на сток рек исследователи высказывают разные мнения: одна их часть полагает, что уменьшение оледенения ведёт к катастрофическим гидрологическим последствиям; другая считает, что водные ресурсы при этом не изменяются, хотя режим рек и, в первую очередь, внутригодовое распределение стока достаточно явно реагируют на сокращение ледников. Наша задача – оценить, как влияет на сток рек быстрое сокращение площади оледенения бассейнов нескольких горных рек Средней Азии.

Что такое ледниковый сток? Прежде всего, необходимо определить, что мы понимаем под *ледниковым питанием рек*. В своё время учёные активно дискутировали по поводу того, что включать в это понятие [1, 6, 10, 13, 16, 17 и др.]. В результате сложились две основные точки зрения: первая – относить к ледниковому питанию всю воду, образующуюся от таяния на поверхности ледника, в том числе сезонный снег и даже дождь, выпадающий на неё; вторая – включать в ледниковое питание таяние только льда и фирна, образовавшихся в предшествующие годы.

Первая точка зрения хороша с позиций оценки баланса массы ледников. Однако при

этом из общего стока с бассейна исключается снеговая составляющая с части водосбора, занятой ледниками. Если принять эту точку зрения, то, например, талый сток снега, лежащего в лесу, следует называть лесным, а на осыпи – осыпным. Однако это удобно при достаточно грубых расчётах абляции и стока, в частности по летней температуре воздуха [13–15], и для некоторых других балансовых гляциологических расчётов. Вторая точка зрения, по нашему мнению более правильная, чётко сформулирована А.С. Щетинниковым [18]: «Ледниковое питание формируется за счёт таяния многолетних запасов льда и фирна (под которым понимается снег на ледниках, между выпадением и таянием которого прошло время не менее одного года, иначе говоря, снег, оставшийся после предыдущего гидрологического (балансового) года). Именно в этом заключается основная гидрологическая роль ледников – аккумулировать годичный избыток осадков, перераспределяя его расход в многолетии. Сезонный снег на ледниках, стаивая в тёплое время года, участвует в *быстром влагообороте*. Нестаявшие в фирновых областях его остатки трансформируются в фирн, а затем – в лёд, которые участвуют в *замедленном влагообороте*». Именно такой подход используют обычно гидрологи при математическом моделировании стока горных рек [3–5 и др.].

Однако в наших расчётах мы будем использовать упомянутые выше связи интенсивности таяния с летней температурой воздуха, а следовательно, определять совместно и ледниковую (как её определил А.С. Щетинников),

и сезонную снеговую с поверхности ледников составляющие стока, т.е. ледниковый сток, соответствующий первому определению, и называть его «суммарным стоком с ледников».

Методика исследований

Из общего объёма воды, поступающей в речную сеть с ледников при стационарном состоянии оледенения и даже при увеличении его площади, можно выделить ту его часть, которая обусловлена сокращением оледенения. В отдельные годы она может быть и отрицательной, когда объём ледников в результате благоприятных метеоусловий возрастает и часть воды, содержащаяся в сезонном снеге, не поступает в русловую сеть. Тем не менее, мы будем условно также называть её стоком. Рассмотрим отдельно общий сток с ледников и составляющую, связанную с изменением объёма ледников в результате сокращения оледенения.

Ежегодный объём талой воды с ледников Q_{g1} можно рассчитать по средней летней (июль–август) температуре воздуха на средней высоте границы питания ледников в бассейне $T_s(Z_f)$ по эмпирическим формулам [13–15] и площади, покрытой ледниками F_g . Для этой цели мы использовали известную формулу Кренке–Ходакова [14], связывающую годовую абляция с величиной T_s :

$$Ab = (9,5 + T_s)^3.$$

В первом приближении для большинства ледников Средней Азии можно принять, что инфильтрационное льдообразование незначительно и вся талая вода попадает в сток, т.е. коэффициент ледникового стока равен единице [17]. В этом случае средний годовой расход ледникового питания

$$Q_{g1} = \frac{1}{31,5 \cdot 10^3} Ab(Z_f) F_g, \text{ м}^3/\text{с},$$

где стоящий впереди коэффициент обеспечивает размерность среднего годового расхода в $\text{м}^3/\text{с}$, если размерность абляции даётся в $\text{мм}/\text{год}$, а площадь оледенения – в км^2 .

Средняя летняя температура воздуха на средней высоте границы питания в бассейнах определялась с помощью линейной экстраполяции этой величины на ближайших (по высоте и расстоянию) метеостанциях, как это обычно делается в гидрологических и гляциологических расчётах [3, 4]:

$$T_s(Z_f) = T_s(Z_{st}) + \gamma(Z_f - Z_{st}),$$

где Z_{st} – высота станции; γ – вертикальный градиент температуры, принимался равным $-6,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{км}$.

Высота границы питания для каждого из бассейнов принята неизменной для расчётных периодов, так как материалы инвентаризации оледенения многих речных бассейнов в Средней Азии показывают, что даже при быстром уменьшении площади оледенения эта величина меняется незначительно [18]. Количество воды, поступающей в реку при уменьшении объёма ледников (или, наоборот, изымаемой из стока при увеличении их объёма), рассчитывалось следующим образом. Объём каждого ледника в годы инвентаризации оледенения определялся по формуле Ерасова [11] $v = 0,027f^{1,5} \text{ км}^3$, где f – площадь поверхности ледника, км^2 . Суммарный объём льда в ледниках бассейна на дату каждой инвентаризации рассчитан как сумма объёмов всех ледников. Затем находилась суммарный объём воды, содержащейся в виде льда в ледниках. Принималось, что средняя плотность ледникового льда составляет $0,9 \text{ г}/\text{см}^3$. Возможная ошибка от этого допущения в конечных расчётах едва ли будет велика по сравнению с ошибками, вызванными другими причинами. Для каждого из выбранных бассейнов имелись данные трёх инвентаризаций, поэтому можно было составить простые зависимости суммарного объёма воды в ледниках от площади оледенения. Заметим, что расчёт делался не по обобщённой формуле [21], а по полученным нами индивидуальным формулам для каждого речного бассейна. Пользуясь этими зависимостями, мы могли рассчитать объёмы воды, содержащейся в ледниках в нужные нам годы.

Периоды, для которых выполнялись расчёты, зависели от наличия данных по стоку исследуемых рек и материалов метеонаблюдений на опорных станциях, а также времени инвентаризации оледенения. Поэтому, как будет видно дальше, эти периоды оказались неодинаковыми для разных бассейнов. Очевидно, что расчётный период должен находиться между первым и последним периодами инвентаризаций. Для пяти бассейнов из шести выбранных (см. далее) определены средние за расчётные периоды доли в речном стоке общего стока с ледников и его части,

Таблица 1. Характеристика рек, для которых выполнен расчёт

Река	Пост	Площадь речного бассейна, взятая из гидрологических ежегодников, F_b , км ²	Суммарная площадь ледников в бассейне в начале расчётного периода F_g , км ²	Степень оледенения бассейна в начале расчётного периода F_g/F_b , %	Метеостанция и её высота Z_{st} , км	Расчётный период, годы
Ойгаинг	Устье р. Коксу	466	33,8	7,3	Пскем – 1,26	1964–2000
Пскем	Муллала	2440	114,4	4,9		1965–2001
Сох	Сарыканда	2480	246,3	9,9	Санзар – 1,31	1957–2001
Зеравшан	Худгиф	1100	311,3	28,3	Дехавз – 2,56	1962–2000
	Дупули	10200	663,2	6,5		1957–1997
Язгулем	Мотравн	1940	330,4	17,0	Ледник Федченко – 4,17	1954–1980

связанные с изменением площади и объёма оледенения (которая, напомним, может быть и отрицательной). Для одного же – р. Сох – расчёт сделан и для каждого года. При этом использована методика расчёта ежегодных изменений площади оледенения [9, 20]. В результате было установлено, как меняются ледниковые составляющие от года к году.

Исходные данные

Для решения нашей задачи необходимо было подобрать такие речные бассейны со значительным оледенением, для которых, во-первых, имеются многолетние ряды гидрологических наблюдений, во-вторых, достаточно близко и в плане, и по высоте есть метеостанции с длительными периодами наблюдений, в-третьих, существуют сведения об изменении оледенения за достаточно продолжительный период и было несколько, как минимум три, инвентаризаций ледников. Кроме того, желательно, чтобы выбранные речные бассейны находились в разных районах Средней Азии, на разной высоте и имели разную степень оледенения. Эта задача оказалась достаточно сложной.

Единственная официальная полная инвентаризация ледников Средней Азии была выполнена при создании Каталога ледников СССР на основе материалов аэрофотосъёмки середины XX в. Для некоторых районов позже выполнена повторная инвентаризация с использованием данные аэрофото- и космосъёмки более поздних лет. Важные помехи – резкое уменьшение объёма и ухудшение качества гидрологической и метеорологической информации после распада СССР [19]. Многие горные станции и посты, данные которых исключительно важны для оценки режима

оледенения, закрылись, а материалы действующих часто вызвали сомнения. На некоторых станциях (Ледник Федченко, Тянь-Шань и др.) стандартные наблюдения были заменены автоматическими без каких-либо параллельных наблюдений. И всё-таки, несмотря на все трудности, нам удалось выбрать речные бассейны и ближайšie к ним метеостанции (табл. 1). Начальные сведения об оледенении бассейнов взяты из соответствующих выпусков Каталога ледников СССР, конечные – из работ [2, 12, 18]. В тех случаях, когда период работы опорной метеостанции или гидрологического поста не охватывал весь период между инвентаризациями и станция начинала работать позже или прекращала работу раньше, площадь оледенения бассейнов на эти годы рассчитывалась простой линейной интерполяцией между датами инвентаризаций. К бассейну р. Сох это не относится, так как для него рассчитывались ежегодные изменения площади оледенения, о чём будет сказано дальше.

Из табл. 1 видно: 1) опорные метеостанции в большинстве случаев расположены низко, а следовательно, для расчёта по их данным летней температуры на ледниках требуется значительная экстраполяция по высоте; 2) доля оледенения бассейнов в начальные периоды расчёта лежала в пределах 5–30%; 3) расчётные периоды различны. Однако для нашей задачи последнее не имеет значения, так как нас интересует не сравнение ледникового питания выбранных рек, а только его доля в каждой из них в период сокращения оледенения. Из гидрометеорологических данных использованы ряды средних годовых расходов воды и средней летней температуры воздуха за соответствующие периоды.

Таблица 2. Оценка средней многолетней доли ледникового стока

Река	Пост	Площади оледенения бассейнов в расчётный период, км ²		Средний многолетний среднегодовой общий расход воды Q_a , м ³ /с	Средний за расчётный период суммарный сток с ледников Q_{g1} , м ³ /с	Доля Q_{g1} в общем стоке реки, %	Средняя за период часть ледникового стока, вызванная изменением оледенения Q_{g2} , м ³ /с	Доля Q_{g2} в среднем годовом стоке реки, %	Линейный тренд средних годовых расходов воды Tr , %/год
		начальный F_{g1}	конечный F_{g2}						
Ойгаинг	Устье р. Коксу	33,8	25,8	12,8	2,71	21,2	0,26	2,0	0,2
Пскем	Муллала	114,4	89,4	76,8	9,36	12,2	0,71	0,9	-0,1
Сох	Сарыканда	246,3	191,9	156	42,8	23,8	7,46	7,3	0,5
Зеравшан	Худгиф	311,3	268,5	32,8	19,1	58,2	5,40	16,5	-1,0
	Дупули	663,2	537,1	44,2	10,5	27,4	3,22	4,8	0,3
Язгулем	Мотравн	330,4	262,7	36,0	7,77	21,6	5,56	15,5	0,4

Результаты

Данные расчётов приведены в табл. 2. Прежде всего, видно, что доля стока с ледников (собственно ледникового и сезонного снегового) составляет от 12 до 60% общего годового стока рек. Наибольшей величины она достигает в верховьях р. Зеравшан (пост Худгиф). Этого и следовало ожидать, так как доля площади бассейна, покрытая ледниками в начале расчётного периода, составляла там 28%. Естественно, сток этой реки весьма чувствителен к уменьшению площади оледенения: соответствующая доля стока с ледников равна примерно 16%. Велика эта доля и в р. Язгулем, что вызвано значительным уменьшением площади ледников в этом бассейне. Для остальных же четырёх рек эта доля лежит в пределах первых процентов. В целом, для больших рек, если говорить о расположенных в их низовьях постах, влияние сокращения оледенения незначительно и в большинстве случаев лежит в пределах точности расчётов годового стока. Для Сырдарьи и Амударьи это было показано ранее Ю.Н. Ивановым [19]. Интересно сопоставить эти величины с линейными трендами общего стока рек за расчётные периоды, показанными в последней графе табл. 2. Как видим, их значения находятся в пределах 1% и при большой межгодовой изменчивости стока – внутри статистических ошибок вычислений, т.е. влияние сокращения оледенения не устанавливается.

Посмотрим теперь, как доля стока с поверхности ледников меняется от года к году на примере р. Сох (пост Сарыканда). Прежде всего рассчитывались ежегодные изменения площади оледенения её бассейна с помощью

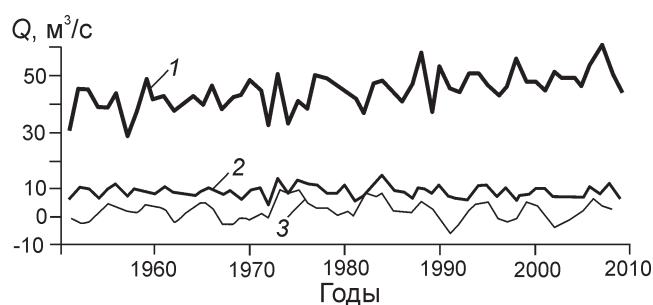


Рис. 1. Многолетние изменения стока р. Сох – пост Сарыканда (1 – Q_a), сток, образующийся на площади оледенения бассейна (2 – Q_{g1}), и часть последнего, вызванная изменением объёма ледников (3 – Q_{g2})

Fig. 1. Long term changes of run-off in Sokh River (Sarykanda station) (1 – Q_a), run-off forming at the glacierized area of the basin (2 – Q_{g1}), and fraction of the last one due to glaciation volume change (3 – Q_{g2})

методики, разработанной ранее [9, 20], которая, помимо прочего, позволила рассчитать изменения площади за более продолжительный период – годы, предшествующие первой инвентаризации и последующие за последней. Эти результаты показаны на одном из рисунков в статье [9]. Все прочие расчёты делались так же, как и для остальных бассейнов. На рис. 1 показаны многолетние (1951–2009 гг.) изменения стока р. Сох и его составляющих, связанных с ледниками. Хорошо видно, что сток реки монотонно увеличивается, что связано, скорее всего, с некоторым ростом годовых сумм осадков в этом районе. В то же время сток с поверхности ледников даже для этого бассейна, имеющего значительную площадь оледенения (см. табл. 1), составляет небольшую часть общего стока. Естественно, он медленно уменьшается в связи с сокращением оледенения.

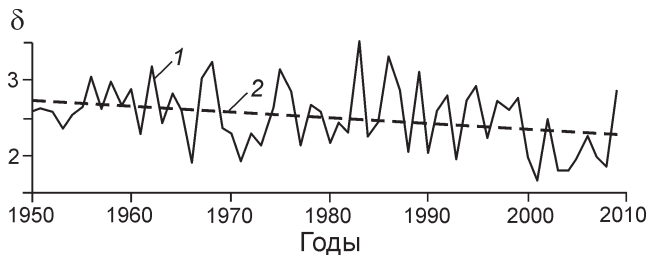


Рис. 2. Многолетний ход параметра δ (1) для р. Сох (пост Сарыканда) (2 – тренд)

Fig. 2. Long term change of δ (1) parameter at Sokh River (Sarykanda station) (2 – trend)

Нижняя кривая на рис. 1 (Q_{g2}) показывает приток или отток воды из ледников, образующиеся в результате изменения их объёма. Если эта величина положительна, то формируется дополнительный сток в реку за счёт сокращения оледенения. В благоприятные для ледников годы, когда выпавший на них зимой снег летом не успевает растаять и оставшаяся его часть идёт на увеличение массы ледников (положительный баланс), она отрицательна. Очевидно, что эта часть воды изымается из стока данного года.

Полученные данные показывают, что влияние современного сокращения оледенения горных речных бассейнов в Средней Азии слабо влияет на сток. Он временно, в период быстрого сокращения оледенения, увеличивается максимум на 15–20% на реках, оледенение бассейнов которых велико (Зеравшан – Дехауз, Язгулем – Мотравн). Для подавляющего же большинства рек, гидрометрические посты на которых расположены далеко от ледников и доля площади оледенения бассейнов невелика, дополнительная вода за счёт уменьшения объёмов ледников составляет первые проценты. Очевидно, что подобные расчёты полезно выполнить для большего числа бассейнов, однако, по нашему мнению, общая картина ясна.

Рассмотрим ещё один вопрос. Хорошо известно, что в условиях Средней Азии, особенно юго-западной её части, где осадки выпадают преимущественно в зимне-весенний период, а лето сухое, велика роль ледников в формировании внутригодового распределения стока. Чем больше оледенение речного бассейна, тем дальше к осени сдвигается половодье. В.Л. Шульц предложил показатель внутригодового распределения стока δ , равный отношению объёмов стока за июль–сентябрь и

март–июнь. Оказалось, что значения δ позволяют судить о типе питания реки [16, 17]. При значительном сокращении оледенения этот параметр должен уменьшаться. На рис. 2 показан многолетний ход δ для той же р. Сох. Эта река, по классификации В.Л. Шульца, имеет ледниково-снеговое питание. Как и следовало ожидать, указанный параметр заметно уменьшился в последние 50–60 лет.

В прошлом внутригодовое распределение стока в Средней Азии имело очень большое значение для сельского хозяйства, так как поля нуждаются в поливе именно в летний период. Поэтому реки, в бассейнах которых имелось оледенение и половодье на них происходило летом, были наиболее удобны. Однако в последние десятилетия этот фактор потерял былую роль, так как практически все крупные реки, вода которых используется для орошения, зарегулированы водохранилищами.

Теперь остановимся на точности наших расчётов. К сожалению, она невелика, хотя дать какие-либо численные её оценки пока невозможно. Ошибки связаны с рядом причин:

- 1) плохое качество исходных гидрометеорологических данных;
- 2) далёкая экстраполяция летней температуры воздуха со станций на среднюю высоту границы питания ледников в бассейнах по среднему значению вертикального градиента температуры, хотя последний заметно меняется во времени и пространстве [8];
- 3) большая чувствительность формулы Кренке–Ходакова к ошибкам в расчёте летней температуры воздуха [7]; кроме того, в ней не учитываются региональные особенности абляции;
- 4) ошибки в расчёте объёмов оледенения с использованием формулы Н. Ерасова [11].

Существуют и другие источники ошибок. Однако в целом можно считать, что на качественном уровне влияние сокращения оледенения на сток горных рек показано достаточно убедительно.

Заключение

Наши расчёты показали, что современное изменение горного оледенения существенно не влияет на водные ресурсы рассмотренных в работе рек Средней Азии, а лишь приводит к некоторому изменению внутригодового распределения стока. Конечно, подобные расчёты

полезно выполнить ещё для ряда речных бассейнов. Однако дальнейшие уточнения, если их удастся сделать на имеющихся грубых и не всегда достоверных исходных данных, скорее всего, не изменят качественную картину и следующие из неё выводы.

Литература

1. Авсюк Г.А. Искусственное усиление таяния льда и снега горных ледников // Тр. ИГАН. 1953. Вып. 56. С. 5–43.
2. Батыров Р.С., Яковлев А.В. Мониторинг ледников некоторых районов Гиссаро-Алая с использованием космических снимков ASTER // Тр. НИГМИ. 2004. Вып. 3 (248). С. 14–21.
3. Боровикова Л.Н., Денисов Ю.М., Трофимова Е.Б., Шенцис И.Д. Математическое моделирование процесса стока горных рек. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 152 с.
4. Боровикова Л.Н., Глазырин Г.Е., Коновалов В.Г. Расчёт гидрографа стока из ледниковых бассейнов с помощью линейных моделей // Режим ледников и снежных лавин Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1979. С. 85–95.
5. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Современные проблемы гидрологии. М.: «Академия», 2008. 319 с.
6. Владимиров Л.А. Питание рек и внутригодовое распределение речного стока на территории Грузии. Тбилиси: «Мецниереба», 1964. 250 с.
7. Глазырин Г.Е. Горные ледниковые системы, их структура и эволюция. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 109 с.
8. Глазырин Г.Е., Группер С.Р., Глазырина М.Г. Изменение климата на разных высотах в Узбекистане // Тр. НИГМИ. 2007. Вып. 8 (253). С. 5–14.
9. Глазырин Г.Е., Яковлев А.В. Оценка ежегодных изменений площади оледенения речных бассейнов // МГИ. 2009. Вып. 107. С. 67–71.
10. Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 247 с.
11. Ерасов Н.В. Метод определения объёма горных ледников // МГИ. 1968. Вып. 14. С. 307–308.
12. Карандаева Л.М. Оценка современного оледенения бассейна реки Пскем по данным ASTER TERRA // Тр. НИГМИ. 2004. Вып. 3 (248). С. 96–100.
13. Кренке А.Н. Ледниковое питание рек // Гляциологический словарь / Под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. С. 209.
14. Кренке А.Н., Ходаков В.Г. О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // МГИ. 1966. Вып. 12. С. 153–164.
15. Лебедева И.М. Водно-ледовый баланс и формирование ледникового стока (наблюдения, измерения, расчёты) // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. С. 309–338.
16. Шульц В.Л. Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 302 с.
17. Щеглова О.П. Питание рек Средней Азии. Ташкент: изд. СамГУ, 1960. 244 с.
18. Щетинников А.С. Морфология и режим ледников Памиро-Алая. Ташкент: изд. САНИГМИ, 1998. 219 с.
19. Glazirin G.E. Hydrometeorological monitoring system in Uzbekistan // Assessment of Snow, Glacier and Water Resources in Asia. Koblenz, 2009. P. 65–83.
20. Glazirin G., Kodama Y. Evaluation of glacierized area of mountainous river basin in transition // Bull. of Glaciol. Research (Japan). 2003. V. 20. P. 1–6.
21. Meier M.F., Bahr D.B. Counting glaciers: Use of scaling method to estimate the number and size distribution of the glaciers of the world // A tribute to Mark F. Meier. 1966. P. 89–94. (US Army CRREL Special Rep.).

Summary

Glaciers form a great deal of runoff of rivers in Central Asia. It is clear that amount of melted water directly depends on total area of glaciers in the river basins – their glaciation. It is well known that at present the area quickly reduces. The complete inventory of glaciers was performed in former Soviet Union in the middle of last century. Airphoto images were used as a basis for our calculations. The inventory was repeated later for several river basins using airphoto- and space images. Unfortunately only three inventories is performed in several river basins for the last half of XX century. Amount of water, coming to a river network from glaciers, can be divided into two parts. The first is usual annual melting. It exists under stationary glaciation condition. The second, being part of the first, is caused by reduction of the glaciation volume. It can be negative in some years when glaciers volume is increasing as a result of favorable meteorological conditions. In these cases the part of water containing in seasonal snow cover does not go to river network. Two components of the glacial feeding were calculated for six rivers located in various regions of Central Asia. It is shown that present day glaciers reduction does not lead to disastrous consequences for river run-off. It leads only to the changes of annual distribution in the run-off. The results should be considered as preliminary because of low accuracy of hydrometeorological data and number of admissions during calculation.