

Оценка ежегодных изменений площади оледенения речных бассейнов

Г.Е. Глазырин, А.В. Яковлев

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт Узгидромета, Ташкент

Предложена усовершенствованная методика расчёта площади оледенения для каждого года по данным нескольких инвентаризаций ледников и информации ближайшей репрезентативной метеорологической станции.

Введение

Ледники играют заметную роль в формировании экологической обстановки многих горных районов, но главное — они образуют значительную часть стока, что особенно важно для таких засушливых районов, как Средняя Азия. Очевидно, что количество талой воды непосредственно зависит от суммарной площади ледников в бассейне — площади его оледенения. Однако эта площадь, как известно, быстро сокращается. Единственная полная инвентаризация ледников бывшего Союза была выполнена при создании многотомного Каталога ледников СССР на основе материалов аэрофотосъёмки середины прошлого века. Для некоторых районов она была затем повторена с использованием аэрофото- и космосъёмки более поздних лет. Однако в лучшем случае лишь для некоторых бассейнов имеются три инвентаризации разных лет.

Вместе с тем для гидрологических оценок необходимо знать площадь оледенения в речных бассейнах и его распределение по высоте в годы, для которых выполняются расчёты. Поэтому следовало разработать метод интерполяции таких данных за периоды между инвентаризациями, а также за несколько лет до первой инвентаризации или после последней.

Предлагаемая методика позволяет рассчитать ежегодное изменение площади оледенения. Идея метода изложена в [4, 10], однако его пришлось существенно видоизменить и упростить. Как и прежде, использование метода возможно при наличии нескольких инвентаризаций ледников (минимум трёх) для бассейна и метеорологической станции в нём с рядом наблюдений за температурой воздуха и осадками за весь период между инвентаризациями и достаточно хорошо коррелируемым с условиями в ледниковой зоне.

Метод

Будем считать, что существует некоторая высота Z_f , связанная с площадью оледенения F_g зависимостью $F_g(Z_f)$, например, средняя высота оледенения, средняя взвешенная по площади ледников высота оледенения или ещё какая-либо подобная величина. Важно, что эта связь должна быть обратной: чем больше Z_f , тем меньше F_g . Если такая зависимость существует, то можно непосредственно применить метод, описанный в [4, 10]. Примем, что скорость

изменения Z_f связана с разницей этого параметра с некоторой климатической высотой фирновой линии ELA простым соотношением:

$$\frac{dZ_f}{dt} = C \cdot (ELA - Z_f), \quad (1)$$

где C — параметр (его расчёт приведён ниже). ELA непосредственно не зависит от оледенения, а только от местных климатических условий. Пользуясь уравнением (1) и задав некоторое начальное значение Z_f , можно вычислить изменение этой величины от года к году, так как ELA может быть рассчитана по ежегодным данным метеостанции, и с помощью зависимости $F_g(Z_f)$ найти площадь оледенения для каждого года.

Расчёт ELA

По ежемесячным данным о температуре воздуха и осадках на станции, расположенной на высоте Z_{st} , можно рассчитать среднюю летнюю температуру T_{sum} и осадки за гидрологический год (октябрь—сентябрь) P_{ann} . Допустим, что обе эти величины можно экстраполировать по высоте. Полученные зависимости примем, вслед за Ю.М. Денисовым [5], в виде:

$$T_{sum}(Z) = T_{sum}(Z_{st}) + \gamma \cdot (Z - Z_{st})$$

и (2)

$$P_{ann}(Z) = P_{ann}(Z_{st}) \cdot (1 + k \cdot (Z - Z_{st}))$$

Здесь γ — вертикальный градиент температуры и k — параметры.

Для западной части Средней Азии правомерно допущение, что годовое количество осадков в горах равно годовой аккумуляции Ac , а годовая абляция Ab связана со средней летней температурой зависимостью, полученной А.Н. Кренке и В.Г. Ходаковым [6]:

$$Ab = (\alpha + T_{sum})^3,$$

где α — параметр, принятый авторами равным 9,5. Ниже будет сказано, почему мы не воспользовались этим значением.

На высоте ELA годовая аккумуляция и абляция равны, т.е.

$$P_{ann}(Z_{st}) \cdot (1 + k \cdot (ELA - Z_{st})) = (\alpha + T_{sum}(Z_{st}) + \gamma \cdot (ELA - Z_{st}))^3. \quad (3)$$

Если параметры k , γ и α известны, то, решая это нелинейное уравнение, можно найти для каждого

года ELA , а затем с помощью описанных выше зависимостей рассчитать сначала Zf , а затем и Fg .

Расчёт параметров

Параметры γ и особенно k определяются недостаточно точно по данным непосредственных измерений, поэтому приходится делать некоторые допущения. Так, чтобы рассчитать начальные значения ELA_0 , мы воспользовались достаточно надёжными данными, полученными на леднике Абрамова, на котором в течение многих лет выполнялись детальные метеорологические и балансовые исследования [3, 6, 7]. Оказалось, что средняя высота ледника, определённая методом Куровского, равна 4,17 км [3], а средняя многолетняя высота, на которой годовой удельный баланс равен нулю, — 4,24 км [7]. Таким образом, разница между ними составляет 0,07 км. Поэтому в расчётах мы принимали, что ELA_0 примерно на 0,1 км больше, чем средняя высота оледенения в соответствующем бассейне на дату первой инвентаризации.

Практически для всех бассейнов рек Средней Азии нет реальных данных о количестве осадков в ледниковой зоне. Ниже мы покажем, какие годовые суммы осадков были приняты для высоты ELA_0 . Обозначим эти суммы как $P_{ann}(ELA_0)$. Теперь из уравнения (2) для каждого бассейна можно рассчитать параметр k :

$$k = \left(\frac{P_{ann}(ELA_0)}{P_{ann}(Z_{st})} - 1 \right) / (ELA_0 - Z_{st}).$$

Сравнение годовых сумм осадков по данным нескольких пар станций, расположенных на разной высоте, показало, что систематических временных изменений этого параметра нет, поэтому будем считать его постоянным для каждого рассматриваемого речного бассейна. Как оказалось, вертикальный градиент температуры воздуха γ заметно меняется во времени [2]. Однако для простоты мы приняли его также постоянным и равным для летнего времени $-6,5^\circ\text{C}/\text{км}$. Полагая, что на высоте ELA_0 средняя многолетняя годовая удельная абляция равна средней многолетней годовой аккумуляции $P_{ann}(ELA_0)$, найдём параметр α :

$$\alpha = P_{ann}(ELA_0)^{1/3} - T_{sum}(ELA_0).$$

Теперь у нас есть все параметры, чтобы по данным опорной метеостанции рассчитывать ELA для каждого года, решая нелинейное уравнение (3).

Поиск зависимости $Fg(Zf)$

Неожиданным для нас оказалось отсутствие зависимостей $Fg(Zf)$, если использовать непосредственные данные каталогизаций. С такой проблемой мы столкнулись и ранее [10]. Казалось бы, площадь оледенения уменьшается преимущественно в нижней области его распространения, следовательно, средняя высота Zf должна при этом увеличиваться. Однако, судя по данным [9], значительные вариации площади

оледенения не сказываются однозначно на изменении этой высоты. Причины, по нашему мнению, две. Во-первых, оценка максимальных и минимальных отметок ледников при привязке аэрофото- и особенно космических снимков к карте не слишком надёжна. Во-вторых, сокращение оледенения сопровождается увеличением площади поверхностных морен на языках ледников, замедляя отступление и затрудняя определение положения их концов. В результате зависимости $Fg(Zf)$ оказываются неустойчивыми. По этой причине мы вынуждены были идти другим путём: вместо истинной высоты средней фирновой линии в бассейне взять некоторую фиктивную её высоту, связанную с площадью оледенения простой линейной зависимостью:

$$Zf = a \cdot Fg + b, \quad (4)$$

где a и b — некоторые параметры. Данные первой каталогизации дают возможность рассчитать для года её выполнения и площадь оледенения $Fg1$, и соответствующую высоту $Zf1$. Отсюда находим:

$$b = Zf1 - a \cdot Fg1. \quad (5)$$

Неизвестный параметр a будем затем искать вместе с параметром C в уравнении (1). Иными словами, мы искусственно зададим зависимость $Fg(Zf)$.

Расчёт изменения площади оледенения

Простейший вариант решения уравнения (1) выглядит следующим образом:

$$Zf_i = Zf_{i-1} + C \cdot (ELA_i - Zf_i).$$

Подставив в это выражение уравнение (4), получаем:

$$a \cdot Fg_i + b = a \cdot Fg_{i-1} + b + C \cdot (ELA_i - a \cdot Fg_i - b).$$

Теперь, подставив сюда уравнение (5) и преобразовав, окончательно получим:

$$Fg_i = \frac{1}{1+C} \cdot \left(Fg_{i-1} + \frac{C}{a} \cdot (ELA_i - Zf1) + C \cdot Fg1 \right). \quad (6)$$

Для решения (6) необходимо выбрать начальную площадь оледенения Zf и затем подобрать наилучшее приближение для параметров C и a . Критерием качества будет служить сходство истинных и

Таблица 1
Площадь оледенения бассейнов рек, км²

Бассейн реки	Годы инвентаризации			Zf_{1957} , км
	1957	1980 (1978)	2001	
Шухимардан	39,5	30,1	28,2	4,26
Сох	246,3	214,6	198,2	4,10
Исфара	129,7	125,0	121,0	4,10
Зеравшан	156,6	141,6	135,1	4,09
Ойгаинг	53,6	48,5	40,9	3,74

вычисленных её значений для тех лет, когда была выполнена инвентаризация ледников, например, сумма квадратов разностей этих площадей.

Исходные данные

Расчёты изменения площади оледенения мы выполнили для бассейнов рек Сох, Шахимардан, Исфара (северные склоны Алайского и Туркестанского хребтов), верховий бассейнов рек Зеравшан и Ойгаинг (последняя — левая составляющая р. Пскем в Западном Тянь-Шане). Инвентаризация оледенения в каждом из них была сделана трижды (табл. 1): первая — на основе аэрофотосъемки 1957 г. для составления Каталога ледников СССР, вторая — А.С. Щетинниковым по космическим снимкам 1980 г. [9] (для бассейна р. Пскем использовались снимки 1978 г.), третья — по космоснимкам 2001 г. [1]. К сожалению, в последнем случае отсутствовали снимки некоторых участков бассейнов рек Зеравшан и Пскем, поэтому оценки изменения оледенения в них выполнены только для отдельных, хотя и значительных частей. В табл. 1 приведены также необходимые для расчётов средние высоты оледенения бассейнов в 1957 г.

Достаточно сложной проблемой оказался подбор подходящих опорных метеорологических станций. Дело в том, что высокогорные станции, близкие к перечисленным ледниковым бассейнам, расположены на территории Киргизии. Большинство из них после распада СССР либо прекратили работу, либо их информация стала недоступной. Поэтому нам пришлось подбирать подходящие станции на территории Узбекистана, а среди них выбрать те, периоды наблюдения на которых полностью перекрывают

отрезки времени между каталогизациями, т.е. начали работать ранее 1957 г. и функционировали после 2001 г. По этим критериям для бассейнов первых четырёх рек выбрана станция Санзар, а для бассейна р. Ойгаинг — станция Пскем (табл. 2).

Среднее многолетнее количество осадков на ELA_0 определено следующим образом. Бассейны

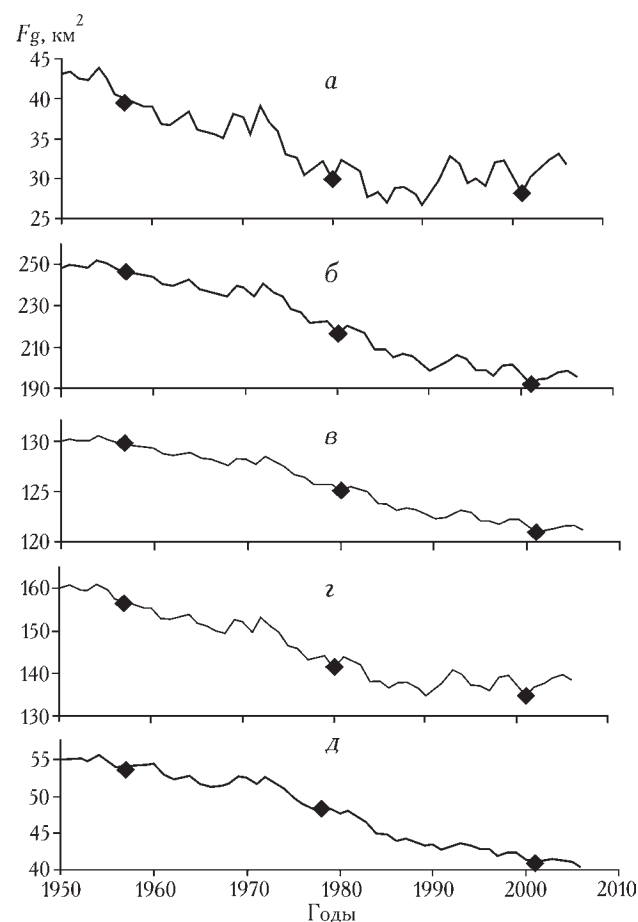


Рис. 1. Изменения площади оледенения F_g в бассейнах рек Шахимардан (а), Сох (б), Исфара (в), Зеравшан (г), Ойгаинг (д) за 1950—2006 гг.

1 — данные инвентаризации, 2 — данные расчётов

Fig. 1. Annual change of glaciation area from 1950 to 2007 in the river basins: а — Shakhimardan, б — Sokh, в — Isfara, г — Zeraвшan, д — Oigaing. 1 — data of inventories, 2 — calculated values

Таблица 2

Средние многолетние летние температуры воздуха (июнь—август) T_{sum} и суммы осадков за гидрологический год (октябрь—сентябрь) P_{ann} , осреднённые за 1950—2006 гг.

Опорная станция	Z_{st} , км	T_{sum} , °C	P_{ann} , мм
Санзар	1,31	21,8	484
Пскем	1,26	20,7	872

Таблица 3

Параметры, необходимые для расчёта изменения площади оледенения

Бассейн реки	ELA_0 , км	$P_{ann}(ELA_0)$, мм	k	α
Шахимардан	4,35	1200	0,49	8,57
Сох	4,15	1200	0,52	7,27
Исфара	4,20	1200	0,51	7,59
Зеравшан	4,19	1200	0,51	7,53
Ойгаинг	3,84	1700	0,37	8,01

Таблица 4

Расчётные параметры изменения площади оледенения C и a в бассейнах рек при изменении климата

Бассейн реки	C	a
Шахимардан	0,1099	−0,01331
Сох	0,0187	−0,00124
Исфара	0,0140	−0,00732
Зеравшан	0,0551	−0,00640
Ойгаинг	0,0003	−0,00013

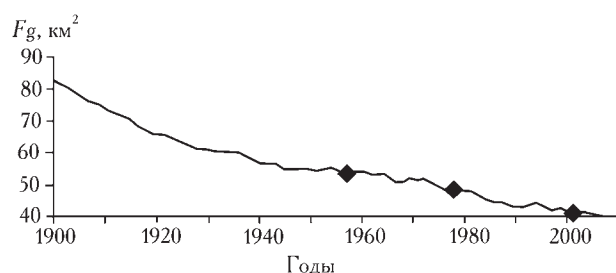


Рис. 2. Рассчитанное ежегодное изменение площади оледенения бассейна р. Ойгаинг (1900—2007 гг.)
Fig. 2. Calculated annual change of glaciation area in Oigang River basin from 1900 to 2007

четырёх рек из пяти, для которых мы делали расчёты (Шахимардан, Сох, Исфара и Зеравшан), расположены недалеко от ледника Абрамова, где на высоте 4,2—4,3 км среднее многолетнее годовое количество осадков составляет примерно 1200 мм. Мы приняли, что во всех этих бассейнах именно такое количество осадков выпадает на высоте ELA_0 , а для бассейна р. Ойгаинг, согласно [8], — 1700 мм. Теперь мы можем вычислить параметры k и α для каждого бассейна. С использованием приведённых в табл. 3 параметров расчёты были сделаны для всех бассейнов за 1951—2006 г. Поскольку начальная дата отстояла от первой каталогизации на 8 лет, начальную площадь оледенения в каждом бассейне в 1950 г. принимали несколько большей, чем она была в 1957 г.

Результаты

В табл. 4 приведены найденные методом оптимизации параметры C и a , а на рис. 1 представлены результаты расчётов для всех бассейнов. Как видим, оледенение довольно чутко реагирует на изменения климата. С 1950 г. до середины 1960-х годов площадь ледников сокращалась. В конце 1960-х — начале 1970-х годов был период некоторого её увеличения, а затем до середины 1980-х — вновь уменьшения. Далее ситуация становится не такой трагичной: в бассейнах рек Сох, Исфара и Ойгаинг темпы сокращения оледенения уменьшились, в бассейне р. Зеравшан оно стабилизировалось, а в бассейне р. Шахимардан начало даже медленно увеличиваться. Видимо, этому способствует монотонный рост годовых сумм осадков и почти неизменная летняя температура в последние десятилетия в горах западной периферии Средней Азии. Обнаруженная тенденция позволяет смотреть в будущее с некоторым оптимизмом. Заметим, что в ряде других горных стран, в частности, в Гималаях и Альпах ситуация гораздо трагичнее.

Весьма заманчиво было попытаться рассчитать изменение площади оледенения за более долгий срок. Рис. 2 иллюстрирует результаты такой попытки, предпринятые для бассейна р. Ойгаинг с использованием метеорологических данных станции Таш-

кент. Как видим, в течение XX в. площадь оледенения там сократилось вдвое.

Закключение

Итак, предложенная ранее методика расчёта ежегодных изменений площади оледенения речных бассейнов существенно усовершенствована и упрощена. Она позволяет рассчитывать соответствующие значения не только за время между инвентаризациями, но и для довольно длинного предшествующего периода или будущего по сценарию изменений климата. При этом, естественно, чем дальше экстраполяция, тем она менее надёжна. Самое существенное «болезненное место» метода, на наш взгляд, — поиск подходящей метеорологической станции, данные которой достаточно хорошо отражают условия в ледниковой зоне бассейна. В Средней Азии эта проблема обострилась в последние годы в связи с прекращением или резким ухудшением качества работы многих высокогорных станций.

Мы признательны С.Р. Группер за подбор необходимых для расчётов метеорологических данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батыров Р.С., Яковлев А.В. Мониторинг горных ледников некоторых районов Гиссаро-Алая с использованием космических снимков ASTER TERRA. — Тр. НИГМИ, 2004, вып. 3 (248), с. 22 — 27.
2. Глазырин Г.Е., Группер С.Р., Глазырина М.Г. Изменение климата на разных высотах в Узбекистане. — Тр. НИГМИ, 2008, вып. 8 (253), с. 5 — 14.
3. Глазырин Г.Е., Камнянский Г.М., Перцигер Ф.И. Режим ледника Абрамова. — СПб., Гидрометеиздат, 1993, 228 с.
4. Глазырин Г.Е., Кодама Ю. Оценка изменения оледенения в переходном режиме при изменениях климата. — МГИ, 2003, вып. 94, с. 212 — 215.
5. Денисов Ю.М. Схема расчета гидрографа стока горных рек. Л., Гидрометеиздат, 1965, 104 с.
6. Ледник Абрамова (Алайский хребет). Л., Гидрометеиздат, 1980, 206 с.
7. Перцигер Ф.И. Режимно-справочное пособие «Ледник Абрамова — климат, сток, баланс массы». Ташкент, изд. САННИГМИ, 1996, 279 с.
8. Щетинников А.С. Ледники бассейна реки Пскем. Л., Гидрометеиздат, 1976, 121 с.
9. Щетинников А.С. Морфология и режим ледников Памиро-Алая. Ташкент, изд. САННИГМИ, 1998, 219 с.
10. Glazirin G.E., Kodama Y. Evaluation of glacierized area of mountainous river basin in transition. — Bull. of Glaciological Research (Japan), 2003, v. 20, p. 1 — 6.

SUMMARY

It is impossible to calculate water resources of the mountainous rivers in Central Asia without information on area and volume of glaciation of their watersheds. It is known that area of the glaciation decreased as much as 25—30 % for the last half of XX century. Therefore, the problem of annual glaciation area change appeared. An offered earlier method, allowing calculation of annual

change the glaciation area, can be used. The method permits to calculate the change for not only periods between glacier inventories, but also extrapolate these changes back from first inventory or in future from last one. However using of initial version of the method faced with significant difficulties. Therefore, it should be changed and simplified. The method can be used if several inventories of glaciers in the river basin (more than two) were performed and a weather station with long term range of observation is located close to the basin. Calculation was

made for Sokh, Shahimardan, Isfara and upper part of Zeravshan River basins. It was complex enough problem to select suitable weather station. The area of glaciation in each river basin was calculated for 1950—2007. It is found that the glaciation is very sensitive to climate change. Its area decreased from 1950 to the middle of 1960th. It increased a little bit later up to middle of 1970th, and then its reduction occurred again. Hereinafter situation, fortunately, becomes not so tragic: the reduction of glaciers was almost stopped.