

Оценка ежегодных изменений площади оледенения речных бассейнов

Г.Е. Глазырин, А.В. Яковлев

Н учно-исследов тельский гидрометеорологический институт Узгидромет , Т шкент

Предложен 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 территорий с засушливыми районами, 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. Единственный полный инвентаризация ледников бывшего Союза был выполнен при создании многотомного Каталога ледников СССР на основе материалов аэрофотосъёмки середины прошлого века. Для некоторых районов он был затем повторён с использованием аэрофото- и космических съёмки 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 данных за периоды между инвентаризациями, тем же 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, использован метод, 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 какие-либо подобные величины. 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, только от местных климатических условий. Пользуясь уравнением (1) и зная некоторое начальное значение Z_f , можно вычислить изменение этой величины от года к году, так как ELA может быть рассчитан 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 — параметр.

Для западной части Средней Азии примерно допущение, что годовое количество осадков в горных районах годовой аккумуляции A_c , годовая бляция Ab связана со средней летней температурой зависимостью, полученной А.Н. Кренке и В.Г. Ходковым [6]:

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

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

На высоте ELA годовая аккумуляция и бляция 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

год ELA , з тем с помощью опис нных выше з висимостей р ссчит ть сн ч л Zf , з тем и Fg .

Расчёт параметров

П р метры γ и особенно k определяются недо-ст точно точно по д нным непосредственных изме-рений, поэтому приходится дел ть некоторые допу-щения. Т к, чтобы р ссчит ть н ч льные зн чения ELA_0 , мы воспользов лись дост точно н дёжными д нными, полученными н леднике Абр мов , н котором в течение многих лет выполнялись дет ль-ные метеорологические и б л нсовые исследов ния [3, 6, 7]. Ок з лось, что средняя высот ледник , определённый методом Куровского, р вн 4,17 км [3], средняя многолетняя высот , н которой годовой удельный б л нс р вен нулю, — 4,24 км [7]. Т ким обр зом, р зниц между ними сост вляет 0,07 км. Поэтому в р счёт х мы приним ли, что ELA_0 пример-но н 0,1 км больше, чем средняя высот оледенения в соответствующем б ссейне н д ту первой инвент -риз ции.

Пр ктически для всех б ссейнов рек Средней Азии нет ре льных д нных о количестве ос дков в ледниковой зоне. Ниже мы пок жем, к кие годовые суммы ос дков были приняты для высоты ELA_0 . Обо-зн чим эти суммы к к $P_{ann}(ELA_0)$. Теперь из ур вне-ния (2) для к ждого б ссейн можно р ссчит ть п р -метр k :

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

Ср внение годовых сумм ос дков по д нным нескольких п р ст нций, р сположенных н р зной высоте, пок з ло, что систем тических временных изменений этого п р метр нет, поэтому будем счи-т ть его постоянным для к ждого р ссм трив емого речного б ссейн . К к ок з лось, вертикальный гр -диент темпер туры воздух γ з метно меняется во времени [2]. Одн ко для простоты мы приняли его т кже постоянным и р вным для летнего времени $-6,5^\circ\text{C}/\text{км}$. Пол г я, что н высоте ELA_0 средняя многолетняя годов я удельн я бляция р вн средней многолетней годовой ккумуляции $P_{ann}(ELA_0)$, н хо-дим п р метр α :

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

Теперь у н с есть все п р метры, чтобы по д н-ным опорной метеост нции р ссчитыв ть ELA для к ждого год , реш я нелинейное ур внение (3).

Поиск зависимости $Fg(Zf)$

Неожид нным для н с ок з лось отсутствие з висимостей $Fg(Zf)$, если использов ть непосред-ственные д нные к т логиз ций. С т кой проблемой мы столкнулись и р нее [10]. К з лось бы, площ дь оледенения уменьш ется преимущественно в нижней обл сти его р спростр нения, следов тельно, средняя высот Zf должн при этом увеличив ться. Одн ко, судя по д нным [9], зн чительные в ри ции площ ди

оледенения не ск зыв ются однозн чно н измене-нии этой высоты. Причины, по н шему мнению, две. Во-первых, оценк м ксим льных и миним льных отметок ледников при привязке эрофото- и осо-бенно космических снимков к к рте не слишком н дёжн . Во-вторых, сокр шение оледенения сопро-вожд ется увеличением площ ди поверхностных морен н язык х ледников, з медляя отступ ние и з трудняя определение положения их концов. В результ те з висимости $Fg(Zf)$ ок зыв ются неустой-чивыми. По этой причине мы вынуждены были идти другим путём: вместо истинной высоты средней фир-новой линии в б ссейне взять некоторую фиктивную её высоту, связ нную с площ дью оледенения про-стой линейной з висимостью:

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

где a и b — некоторые п р метры. Д нные первой к т логиз ции д ют возможность р ссчит ть для год её выполнения и площ дь оледенения $Fg1$, и соответ-ствующую высоту $Zf1$. Отсюд н ходим:

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

Неизвестный п р метр a будем з тем иск ть вместе с п р метром C в ур внении (1). Иными сло-вами, мы искусственно з д дим з висимость $Fg(Zf)$.

Расчёт изменения площади оледенения

Простейший в ри нт решения ур внения (1) выглядит следующим обр зом:

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

Подст вив в это выр жение ур внение (4), получ ем:

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

Теперь, подст вив сюд ур внение (5) и преобр зо-в в, оконч тельно 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 выбр ть н ч ль-ную площ дь оледенения Zf и з тем подобр ть н и-лучшее приближение для п р метров C и a . Крите-рием к честв будет служить сходство истинных и

Т блиц 1
Площ дь оледенения б ссейнов рек, км²

Б ссейн реки	Годы инвент риз ции			Zf_{1957} , км
	1957	1980 (1978)	2001	
Ш хим рд н	39,5	30,1	28,2	4,26
Сох	246,3	214,6	198,2	4,10
Исф р	129,7	125,0	121,0	4,10
Зер вш н	156,6	141,6	135,1	4,09
Ойг инг	53,6	48,5	40,9	3,74

вычисленных её значений для тех лет, когда был выполнен инвентаризация ледников, например, суммарных значений этих площадей.

Исходные данные

Расчёты изменения площади оледенения мы выполнили для бассейнов рек Сох, Шхимрда, Исфар (северные склоны Алатау и Туркестанского хребтов), верховий бассейнов рек Зеравшан и Ойгинг (последняя — левая составляющая р. Пскем в нижнем Тянь-Шане). Инвентаризация оледенения в каждом из них была сделана трижды (табл. 1): первая — на основе аэрофотосъёмки 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 оказалась 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, среди них выбрать те, периоды наблюдений которых полностью перекрывают

отрезки времени между каталогизациями, т.е. не менее 1957 г. и функционировали после 2001 г. По этим критериям для бассейнов первых четырёх рек выбраны станции Сизир, для бассейна Ойгинг — станция Пскем (табл. 2).

Среднее многолетнее количество осадков ELA_0 определено следующим образом. Бассейны

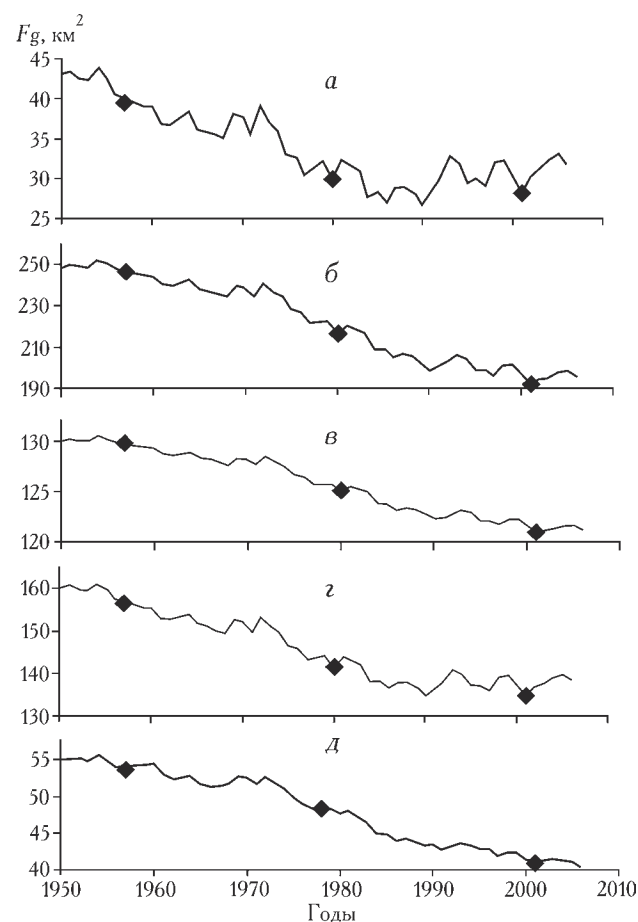


Рис. 1. Изменения площади оледенения F_g в бассейнах рек Шхимрда (а), Сох (б), Исфар (в), Зеравшан (г), Ойгинг (д) за 1950—2006 гг.

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

Таблица 2

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

Опорная станция	Z_{st} , км	T_{sum} , °C	P_{ann} , мм
Сизир	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
Шхимрда	4,35	1200	0,49	8,57
Сох	4,15	1200	0,52	7,27
Исфар	4,20	1200	0,51	7,59
Зеравшан	4,19	1200	0,51	7,53
Ойгинг	3,84	1700	0,37	8,01

Таблица 4

Расчётные параметры изменения площади оледенения в бассейнах рек при изменении климата

Бассейн реки	C	a
Шхимрда	0,1099	−0,01331
Сох	0,0187	−0,00124
Исфар	0,0140	−0,00732
Зеравшан	0,0551	−0,00640
Ойгинг	0,0003	−0,00013

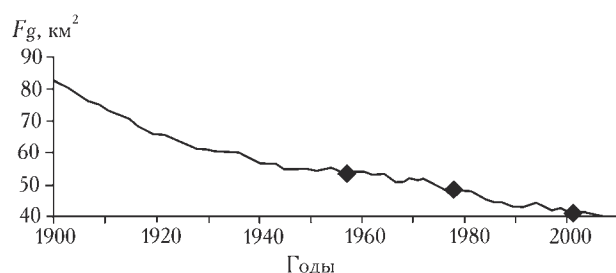


Рис. 2. Рассчитанное ежегодное изменение площади оледенения бассейна р. Ойганг (1900—2007 гг.)
Fig. 2. Calculated annual change of glaciation area in Oigang River basin from 1900 to 2007

четырёх рек из пяти, для которых мы делали расчёты (Шхимрदन, Сох, Исфр и Зервшан), расположены недалеко от ледника Абромов, 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 выпадет на высоте ELA_0 для бассейна р. Ойганг, 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 наш ледник отстоял от первой каталогизации на 8 лет, наш ледниковую 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 , 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, затем до середины 1980-х — вновь уменьшения. Далее ситуация становится не такой трогичной: в бассейнах рек Сох, Исфр и Ойганг темпы сокращения оледенения уменьшились, в бассейне р. Зервшан оно стабилизировалось, в бассейне р. Шхимрдан же медленно увеличивалось. Видимо, этому способствует монотонный рост годовых сумм осадков и почти неизменная летняя температура в последние десятилетия в горных перифериях 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 более трагичнее.

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

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

Заключение

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. Своей существенной «больной точкой» метод, 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-Алтая с использованием космических снимков ASTER TERRA. — Тр. НИГМИ, 2004, вып. 3 (248), с. 22 — 27.
2. Глазирин Г.Е., Группер С.Р., Глазирин М.Г. Изменение климата на разных высотах в Узбекистане. — Тр. НИГМИ, 2008, вып. 8 (253), с. 5 — 14.
3. Глазирин Г.Е., Княнский Г.М., Перцигер Ф.И. Режим ледника Абромов. — СПб., Гидрометеонаиздат, 1993, 228 с.
4. Глазирин Г.Е., Кодма Ю. Оценка изменения оледенения в переходном режиме при изменениях климата. — МГИ, 2003, вып. 94, с. 212 — 215.
5. Денисов Ю.М. Схема расчёта гидрографов стока горных рек. Л., Гидрометеонаиздат, 1965, 104 с.
6. Ледник Абромов (Алтайский хребет). Л., Гидрометеонаиздат, 1980, 206 с.
7. Перцигер Ф.И. Режимно-справочное пособие «Ледник Абромов — климат, сток, балансовые данные». Ташкент, изд. САННИГМИ, 1996, 279 с.
8. Щетинников А.С. Ледники бассейна реки Пскем. Л., Гидрометеонаиздат, 1976, 121 с.
9. Щетинников А.С. Морфология и режим ледников Памиро-Алтая. 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.