

# Ледники и ледниковые покровы

УДК 556.131.11

doi: 10.31857/S2076673420020031

## Изменения и репрезентативность параметров горного оледенения

© 2020 г. В.Г. Коновалов

Институт географии РАН, Москва, Россия  
vladgeo@gmail.com

## Changes and representativeness of mountain glaciation parameters

V.G. Konovalov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
vladgeo@gmail.com

Received April 30, 2019 / Revised September 24, 2019 / Accepted December 13, 2019

Keywords: *ablation, Alay ridge, Altay, glaciation, modeling, monitoring, North Caucasus, Pamirs, seasonal runoff, summer mass balance.*

### Summary

The study was aimed at a analysis of changes in the area  $F_{gb}$ , the number  $N_{gl}$  and statistical parameters of distribution for different aggregates of glaciers over two periods: 1946–1975 and 1976–2005. The determined changes in the above parameters of glaciers located in river basins of the following mountain regions: the North Caucasus (Baksan, Chegem, Cherek, Malka, Teberda, Terek), Alay ridge (Akbura, Isfara, Isfayram, Shahimardan, Sokh), Altay (Aktru, Chuya, Katun) and Pamir (Gunt), are presented in the article. For better reliability of the height parameters of the glacier aggregates at the scale of the river basins, the maximum, minimum and average height values of individual glaciers were weighed by area. The trustworthiness of changes of the weighed height parameters confirms consistency with the linear relationship adopted at the scale of the river basin between the dimensions of the glaciers and the average weighed heights of beginning, end and average altitude of individual glaciers. Definition of the concept and the scale of representativeness of local measurements of glacier mass balance in the WGMS database is the actual glaciological problem. The proposed quantitative substantiation and the results of the selection of a group of representative glaciers are, in general, based on the use of parameters of dynamical state of individual glaciers distributed over several intervals from the minimum to maximum area values. The parameters of each glacier included: total area, volume, maximum and minimum height difference, index of morphological type, average thickness, orientation and slope of the surface. The sequence of determining the composition of a sample of representative glaciers on the example of glaciations in the basins of the Kyzylsu Western (Pamir) and Katun (Altai) rivers is described. Important part of the work was performed to reveal the possibilities to use local values ( $Ab - ablation/B_s - summer\ mass\ balance$ ) measured on *a priori* reference/representative glaciers in the WGMS database as an additional argument for modeling and calculation of river runoff at the scale of river basins for June–September and other time intervals. Adding of local values of  $Ab/B_s$  as a complementary argument to the regression equations for regional calculations of runoff of the rivers of a snow-glacial feeding in the North Caucasus, Pamir-Alai and Altai was found to be efficient in only limited number of cases. The hydrological representation of the glacier is a new characteristic of practical importance for solving problems of hydrology and glaciology in river basins of snow-glacial type of the flow formation, which include almost all Alpine river basins. The method of revealing the hydrological representativeness of local  $Ab/B_s$  measurements described in the paper may be used for glaciers from the existing WGMS network.

Citation: Konovalov V.G. Changes and representativeness of mountain glaciation parameters. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019. 60 (2): 165–181. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673420020031.

Поступила 30 апреля 2019 г. / После доработки 24 сентября 2019 г. / Принята к печати 13 декабря 2019 г.

Ключевые слова: *абляция, Алайский хребет, Алтай, летний баланс массы, моделирование, мониторинг, оледенение, Памир, Северный Кавказ, сезонный сток.*

Описано изменение за 1946–2005 гг. статистических характеристик распределения высотных и площадных параметров для совокупностей ледников на Северном Кавказе, Алайском хребте, в бассейнах рек Катунь (Алтай) и Гунт (Памир). Установлены возможность и обоснованность использования локальных измерений абляции/летнего баланса массы на ледниках Джанкуат (Северный Кавказ), Малый Актру (Алтай) и Абрамова (Памиро-Алай) в качестве дополнительного источника информации при расчётах стока рек снегово-ледникового типа питания.

## Введение

В базе данных Всемирной службы мониторинга ледников (*WGMS*) [1] содержатся многолетние ряды наблюдений за годовыми величинами абляции  $Ab$  и летнего баланса массы  $B_s$  на 38 горных ледниках, расположенных на суше, которым априорно присвоен [1–4] статус справочных (*reference*), опорных (*benchmark*) либо «репрезентативных». Число таких ледников указано в работе [1] по состоянию на 2012–2013 гг. Понятие ограниченной по объёму репрезентативной выборки, отражающей свойства генеральной совокупности, широко используется в различных областях науки и практики на основе известных статистических методов. К сожалению, эти методы не нашли применения в гляциологии при формировании [1] ограниченной выборки «репрезентативных» пунктов измерения баланса массы ледников. Пример использования такого типа выборки – результаты расчёта [2, 3] глобального баланса массы для всех 251 547 ледников Земли путём пространственной экстраполяции прямых измерений на 200–350 априорно заданных «репрезентативных» ледниках.

Следовательно, конкретизация понятия, количественное обоснование выбора репрезентативных объектов и исследование масштаба репрезентативности локальных измерений баланса массы ледников в базе данных [1] – актуальные гляциологические проблемы, решение которых служит одной из целей настоящей работы. Отметим также, что корректное применение в расчётах баланса массы термина опорный/справочный/репрезентативный ледник обязательно должно сопровождаться критерием, использованным для выявления данного признака и рекомендуемым либо возможным масштабом его пространственного распространения. Например, «ледник/группа ледников  $NN$  являются опорным(и) по площади/другому признаку/группе признаков в масштабе речного бассейна  $MM$  либо географического региона  $RR$ ».

Многолетние измерения составляющих баланса массы на ледниках в существующей сети *WGMS* можно рассматривать как источник информации для решения задач не только гляциологии, но и гидрологии в дополнение к стандартным данным метеостанций по осадкам и температуре воздуха, которые используются в расчётах и прогнозах состояния водных ресурсов. Для оценки ги-

дрологического потенциала балансовых измерений необходимы методика и исходные данные, отличающиеся от требуемых в предыдущей задаче. Как следствие сказанного, структура работы состоит из двух основных разделов, имеющих различную научно-методическую и информационную основу: 1) динамика и репрезентативность параметров горного оледенения; 2) гидрологическая репрезентативность ледников. Цель второго раздела, логически связанного с первым, состоит в развитии возможностей применения данных о балансе массы репрезентативных ледников совместно с информацией об осадках и температуре воздуха на сети метеостанций для решения задач гидрологии ледниковых бассейнов.

## Исходные данные

Необходимое и очевидное условие разработки и совершенствования методов моделирования, расчёта и прогноза объёма стока с площади оледенения в бассейнах рек снегово-ледникового типа формирования стока – использование морфометрических параметров всех ледников, расположенных выше замыкающего гидрологического створа. Этому условию для горного оледенения, исключая Антарктику, Гренландию и островные ледники, соответствует информация в гляциологических каталогах [5–11]. При подготовке этих справочников использовались различные исходные данные и методы их обработки. Так, в Каталоге ледников СССР [5–7] контуры ледников, характеризующие состояние оледенения 60–70 лет тому назад, были визуализированы вручную по материалам аэрофотосъёмки в масштабах 1:20 000–1:25 000 и перенесены затем на топографические карты масштаба 1:100 000 для определения следующих параметров: числа ледников и их географических координат (долготы –  $long$ , широты –  $lat$ ); площадей ледников  $f_{gl}$  и моренного покрова на них  $f_{mor}$ ; высот начала  $Z_{max}$  и конца ледника  $Z_{min}$ ; средней высоты ледника  $Z_{mean}$ , равной  $(Z_{max} + Z_{min})0,5$ ; ориентации  $a_{gl}$ , максимальной  $l_{max}$  и минимальной длины  $l_{min}$  ледников. В Каталогах [9, 10] основой для полуавтоматического определения площади, высотных и других параметров ледников служили изображения со спутника *TERRA* (сканер *ASTER*), цифровые модели рельефа

Таблица 1. Гидрографические характеристики исследованных речных бассейнов I–IV\*

| Параметры                  | I – $F_{bas} = 7723 \text{ км}^2$ |           | II – $F_{bas} = 58\,400 \text{ км}^2$ |           | III – $F_{bas} = 9621 \text{ км}^2$ |           | IV – $F_{bas} = 13\,700 \text{ км}^2$ |           |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|
|                            | Интервал, годы                    |           |                                       |           |                                     |           |                                       |           |
|                            | 1946–1975                         | 1976–2005 | 1946–1975                             | 1976–2005 | 1946–1975                           | 1976–2005 | 1946–1975                             | 1976–2005 |
| $W_{bas}(1), \text{ км}^3$ | 4,98                              | 5,30      | 19,60                                 | 18,76     | 3,41                                | 3,57      | 3,18                                  | 3,50      |
| $dW_{bas}(1), \%$          | 6,45                              |           | –4,27                                 |           | 4,69                                |           | 10,06                                 |           |
| $W_{bas}(2), \text{ км}^3$ | 4,03                              | 4,22      | 16,75                                 | 15,93     | 2,63                                | 2,76      | 2,60                                  | 2,82      |
| $dW_{bas}(2), \%$          | 4,75                              |           | –4,89                                 |           | 4,94                                |           | 8,46                                  |           |
| $C_v W_{bas}(1)$           | 0,11                              | 0,18      | 0,20                                  | 0,11      | 0,13                                | 0,15      | 0,19                                  | 0,14      |
| $C_v W_{bas}(2)$           | 0,14                              | 0,19      | 0,19                                  | 0,11      | 0,16                                | 0,18      | 0,22                                  | 0,16      |
| $F_{gl}, \text{ км}^2$     | 593,1                             | 488,3     | 742,4                                 | 524,8     | 525,6                               | 562,8     | 535,1                                 | 460,4     |
| $F_{gl}/F_{bas}, \%$       | 8,3                               | 6,8       | 1,3                                   | 0,9       | 5,5                                 | 5,9       | 3,9                                   | 3,4       |
| $dF_{gl}, \%$              | –18,1                             |           | –29,3                                 |           | 7,3                                 |           | –14,0                                 |           |

\*I – Северный Кавказ: бассейн Терека (включает реки: Баксан – гидропост (гп) Заюково, Малка – гп Каменноостокское, Теберда – гп Теберда, Терек верховье – гп Владикавказ, Чегем – гп Нижний Чегем, Черек – гп Советский); II – Алтай – р. Катунь – гп Сростки; III – северные склоны Алайского хребта – сумма стока рек Исфара, Сох, Шахимардан, Исфайрам, Акбура; IV – Памир – р. Гунт – гп Хорог.  $F_{bas}$  – площадь бассейна, км<sup>2</sup>; параметры:  $W_{bas}(1)$  – годовой объём стока;  $dW_{bas}(1)$  – изменение  $W_{bas}(1)$  в 1976–2005 гг. относительно предыдущего интервала времени;  $W_{bas}(2)$  – объём стока за вегетационный период (апрель–сентябрь);  $dW_{bas}(2)$  – изменение  $W_{bas}(2)$  в 1946–2005 гг.;  $C_v$  – коэффициент вариации;  $F_{gl}$  – площадь ледников в бассейне, км<sup>2</sup>;  $dF_{gl}$  – изменение площади оледенения в 1946–2005 гг.

(ЦМР) *SRTM 3* и *ASTER GDEM 2*. При подготовке гляциологического каталога *GAMDAM* [5] в большинстве регионов оледенения Азии была использована ЦМР *SRTM 3*, кроме Гималаев, Каракорума и Центрального Тянь-Шаня, где более приемлемой оказалась ЦМР *ASTER GDEM 2*. Контуры ледников были оцифрованы вручную на 356 изображениях со спутника *LANDSAT ETM+*. В Каталогах [8–10] вместо параметра  $Z_{mean}$  приведён другой параметр –  $Z_{med}$ , соответствующий медиане распределения высоты в пределах контура ледника на ЦМР.

Диапазон однократных определений морфометрических параметров ледников охватывает: в Каталоге ледников СССР [5–7] – 1943–1968 гг.; в Каталоге *RGI v. 5–6* [8, 9] – 1965–2004 гг. на Северном Кавказе, 2000 г. – в бассейнах рек Исфара, Сох, Шахимардан, Исфайрам, Акбура на северных склонах Алайского хребта и р. Гунт; 2006–2013 гг. в бассейне р. Катунь (Алтай). Гидрографические характеристики названных речных бассейнов приведены в табл. 1. Информация в Каталоге *GAMDAM* [10] для ледников р. Катунь относится к 2000–2002 гг. Параметры индивидуальных ледников  $long$ ,  $lat$ ,  $F_{gl}$ ,  $Z_{max}$ ,  $Z_{min}$ ,  $Z_{med}$  в справочниках [8, 9] получены с помощью стандартных программных модулей в *ArcGIS*. Сведения о площади моренного покрова  $f_{mor}$  в [8, 9] отсутствуют.

Многолетние исходные данные по месячному стоку рек в течение года, необходимые для моделирования стока как регрессионной функции температуры воздуха и осадков, получены из региональных гидрологических справочников и ежегодников. Входная информация по температуре воздуха  $T$  и осадкам  $P$  на метеостанциях взята из баз данных [12–14]. Приведём дифференцированный по районам исследования список метеостанций, данные которых использованы при определении параметров уравнения множественной линейной регрессии:

1) *метеостанции в бассейнах рек Северного Кавказа* (после названия указан индекс вида информации и высота пункта в метрах над уровнем моря): Сулак высокогорная ( $PT$ , 2927), Терскол ( $PT$ , 2214), Шаджатмаз ( $PT$ , 2070), Клухорский перевал ( $PT$ , 2037), Теберда ( $PT$ , 1313), Ахты ( $PT$ , 1016), Кисловодск ( $PT$ , 943), Зеленчукская ( $PT$ , 928), Владикавказ ( $PT$ , 702), Красная поляна ( $PT$ , 566), Буйнакск ( $PT$ , 472), Минеральные воды ( $P$ , 315);

2) *метеостанции в бассейнах рек на северном склоне Алайского хребта*: ледник Абрамова – расположен на водоразделе Алайского хребта ( $PT$ , 3840), ледник Северцова ( $P$ , 2780), Ангрэн Киргизский ( $PT$ , 2286), Хайдаркан ( $PT$ , 2000), Исфара ( $P$ , 1978), Джергетал ( $PT$ , 1800), Киргизата ( $P$ , 1766), устье р. Терс ( $PT$ , 1759), Гульча ( $PT$ , 1561),

Таблица 2. Результаты мониторинга ледников в бассейнах рек Северного Кавказа\*

| Параметры                 | $F_{gl} = 593,2 \text{ км}^2$ ;<br>$N_{gl} = 457$ [5] | $F_{gl} = 488,4 \text{ км}^2$ ;<br>$N_{gl} = 371$ [8] | Высоты, взвешенные по площади [5], м над ур. моря |                         |                        | Высоты, взвешенные по площади [8], м над ур. моря |                         |                        | $\hat{Z}_{med}$ |
|---------------------------|---|---|---|-------------------------|------------------------|---|-------------------------|------------------------|-----------------|
|                           |   |   | $\hat{Z}_{max} - 4382$                            | $\hat{Z}_{mean} - 3572$ | $\hat{Z}_{min} - 2814$ | $\hat{Z}_{max} - 4396$                            | $\hat{Z}_{mean} - 3630$ | $\hat{Z}_{min} - 2864$ |                 |
| <i>Asym</i>               | 6,33  | 5,46  | 1,05  | 0,73                    | 0,35                   | 0,94  | 0,17                    | -0,12                  | 0,05            |
| $\Delta(Asym)$ , %        | 1,8   | 2,3   | 10,6  | 15,7                    | 32,2                   | 12,9  | 79,9                    | -113,6                 | 574,5           |
| <i>Ex</i>                 | 53,25   | 39,02   | 1,57  | 1,06                    | 1,12                   | 2,21  | 0,42                    | 0,28                   | 0,25            |
| $\Delta(Ex)$ , %          | 0,4   | 0,6   | 13,9  | 23,0                    | 20,4                   | 10,5  | 62,6                    | 86,8                   | 106,1           |
| <i>RMSD</i>               | 3,04  | 2,85  | 495   | 398                     | 458                    | 460   | 345                     | 399                    | 349             |
| mean                      | 1,30  | 1,32  | 3882  | 3547                    | 3213                   | 3855  | 3507                    | 3159                   | 3496            |
| $\Delta(\text{mean})$ , % | 10,9  | 11,2  | 0,6   | 0,5                     | 0,7                    | 0,6   | 0,5                     | 0,7                    | 0,5             |
| min                       | 0,10  | 0,03  | 2760  | 2660                    | 2000                   | 2674  | 2554                    | 1983                   | 2477            |
| max                       | 36,20   | 29,96   | 5660  | 4990                    | 4800                   | 5614  | 4568                    | 4413                   | 4555            |
| med                       | 0,40  | 0,40  | 3800  | 3525                    | 3210                   | 3813  | 3517                    | 3205                   | 3507            |

\*Расшифровка параметров  $\hat{Z}_{max}$ ,  $\hat{Z}_{mean}$ ,  $\hat{Z}_{min}$ ,  $\hat{Z}_{med}$  дана в тексте;  $F_{gl}$  – площадь ледников;  $N_{gl}$  – число ледников; *Asym* – асимметрия распределения; *Ex* – эксцесс распределения; *RMSD* – среднеквадратичное отклонение; mean – среднее; min – минимум; max – максимум; med – медиана. Символ  $\Delta$  перед названием параметра обозначает относительную ошибку. В квадратных скобках даны ссылки на источники исходных данных.

устье р. Тос (*PT*, 1536), Папан (*P*, 1400), Танги-ворух (*PT*, 1311), Исфана (*PT*, 1300);

3) метеостанции в бассейне р. Катунь (*Алтай*): Каратюрк (*PT*, 2601), Кошагач (*T*, 1759), Эрзин (*T*, 1100), Усть-Кокса (*PT*, 977).

#### Динамика и репрезентативность горных ледников

**Многолетние изменения размеров оледенения.** В работе [15] обосновано использование высотных и площадных параметров ледников за 1946–1975 гг. (данные [5–7]) и 1976–2005 гг. (данные [8, 9]) для расчёта стока с площади оледенения на Северном Кавказе и Алтае в течение 1946–2005 гг. Поскольку внутри каждого из этих интервалов обобщённые сведения о высотноплощадной морфометрии индивидуальных ледников приняты устойчивыми, один из вопросов исследования состоит в оценке изменения площади  $F_{gl}$ , числа  $N_{gl}$  и параметров распределения гипсометрических характеристик ледников (асимметрия, эксцесс, среднее, среднеквадратичное отклонение, минимум, максимум, медиана) между их совокупностями в 1946–1975 и 1976–2005 гг. В такой постановке задача описания пространственно-временной динамики параметров оледенения в целом для речных бассейнов выглядит гораздо богаче обычно используемой суммарной площади ледников в разные моменты времени. Кроме того, для по-

вышения достоверности высотных параметров совокупностей ледников в масштабе речных бассейнов использовано взвешивание по площади высот начала, конца и средней высоты ледников. Результаты изменения площадных и высотных параметров ледников за 1946–2005 гг. в бассейнах рек Северного Кавказа, рек Катунь и Гунт представлены в табл. 1–4.

Значительное сокращение площади оледенения в 1946–2005 гг. (см. табл. 1–4), выявленное по данным исследований [5, 6, 11] и результатам дистанционного мониторинга [8, 9], вполне согласуется с однообразной тенденцией роста средних взвешенных высот  $Z_{max}$ ,  $Z_{min}$ ,  $Z_{mean}$  ледников в бассейнах рек Северного Кавказа, Катунь и Гунт. Количественные значения и изменение среднего, минимума, максимума и медианы в распределениях гипсометрических индексов  $Z_{max}$ ,  $Z_{min}$ ,  $Z_{mean}$  ледников на Алтае, Северном Кавказе и Памире оказались достаточно разнообразными, что связано с минимумом площади  $F_{gl}$  в [8, 9] по сравнению с [5–7]. В большинстве случаев эксцесс распределений  $Z_{max}$ ,  $Z_{min}$ ,  $Z_{mean}$  близок к нулю, что более или менее согласуется с нормальной кривой распределения.

#### Климатические условия районов оледенения.

По мнению автора, методической основой для пространственной экстраполяции локальных измерений абляции/летнего баланса массы должен быть региональный анализ распределения морфометрических параметров ледников и од-

Таблица 3. Результаты мониторинга ледников в бассейне р. Кагуль (Алтай)

| Параметры                 | $F_{gl} = 742 \text{ км}^2$ ;<br>$N_{gl} = 777$ [6] | $F_{gl} = 525/505 \text{ км}^2$ ;<br>$N_{gl} = 965/605$ [9/10] | Высоты, взвешенные по площади [6],<br>м над ур. моря |                         | Высоты, взвешенные по площади [9/10],<br>м над уровнем моря |                             | $\dot{Z}_{med}$ |                              |                             |
|---------------------------|---|--|--|-------------------------|---|-----------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
|                           |   |  | $\dot{Z}_{max} - 3606$                               | $\dot{Z}_{mean} - 3116$ | $\dot{Z}_{min} - 2633$                                      | $\dot{Z}_{max} - 3625/3538$ |                 | $\dot{Z}_{mean} - 3159/3102$ | $\dot{Z}_{min} - 2694/2665$ |
| <i>Asym</i>               | 7,2   | 6,6/5,8  | 0,26   | -0,41                   | -0,22   | 0,00/-0,07                  | -0,46/-0,19     | 0,19/0,05                    | 0,27/-0,05                  |
| $\Delta(Asym)$ , %        | 1,2   | 1,2/   | 189,1  | -14,2                   | -33,9   | -2569,8/                    | -17,3/          | -41,9/                       | -29,4                       |
| <i>Ex</i>                 | 69,1  | 54,3/43,3  | 0,91   | 0                       | -0,01   | 0,80/0,04                   | 1,14/0,10       | 0,64/-0,21                   | 0,93/-0,05                  |
| $\Delta(Ex)$ , %          | 0,3   | 0,3/   | 18,9   | 44,2                    | -285,1  | 19,6/                       | 13,8/           | 24,7/                        | 16,9/                       |
| <i>RMSD</i>               | 2,09  | 1,43/1,74  | 317  | 228                     | 243   | 329/349                     | 253/287         | 253/302                      | 265/300                     |
| mean                      | 0,96  | 0,54/0,84  | 3321   | 3040                    | 2762  | 3253/3282                   | 3062/3065       | 2872/2849                    | 3052/3056                   |
| $\Delta(\text{mean})$ , % | 7,8   | 8,4/   | 0,4  | 0,3                     | 0,3   | 0,3/                        | 0,3/            | 0,3/                         | 0,3/                        |
| min                       | 0,10  | 0,02/0,05  | 2350   | 2235                    | 1970  | 1573/2170                   | 1571/2156       | 1569/1945                    | 1571/2128                   |
| max                       | 28,2  | 16,7/18,1  | 4510   | 33575                   | 3450  | 4403/4470                   | 3854/4152       | 3792/3824                    | 3890/4113                   |
| med                       | 0,40  | 0,13/0,34  | 3320   | 3070                    | 2760  | 3251/3299                   | 3081/3085       | 2880/2841                    | 3067/3056                   |

Условные обозначения см. в табл. 2.

нородности климатических условий существования оледенения. Такой подход вполне согласуется с ранее сформулированными заключениями [16–18] по поводу региональной и глобальной экстраполяции данных измерений баланса массы на сети *WGMS*. Для предварительной оценки пространственной однородности климатических условий  $N_b$  отдельных частей региона/речного бассейна, где создаётся либо уже существует сеть локальных измерений баланса массы ледников, целесообразно использовать предложенную в работе [19] нелинейную зависимость осадков  $x$  от высоты  $z$ :

$$x_i(z) = x_i(z_0)[1 + k_{2i}(z - z_0) + k_{3i}(z - z_0)^2] \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, N_b.$$

Выполнение условий  $k_{2i} > 0$  и  $k_{3i} > 0$  либо  $k_{2i} < 0$  и  $k_{3i} < 0$  служит подтверждением однородности распределения осадков в целом для рассматриваемого региона/речного бассейна. Здесь  $z_0$  – высота опорного пункта измерения осадков. Возможность применения формулы (1) зависит от наличия достаточных данных по осадкам в частных водосборах общего речного бассейна во всём диапазоне высот. Как известно, в общедоступных климатических базах данных такая возможность – скорее исключение, чем правило.

Оценка пространственной однородности полей средних месячных значений температуры воздуха  $T$  и упругости водяного пара в воздухе  $H$  для территории Центральной Азии в диапазонах высоты 0,60–4,2 км над ур. моря (все высоты в статье даны над уровнем моря), 35–44° с.ш. и 67–81° в.д., выполнена [20] путём расчёта с января по декабрь коэффициентов корреляции региональных зависимостей:  $T = T(Z)$ ,  $T = T(Z, long, lat)$ ,  $H = H(Z)$ ,  $H = H(Z, long, lat)$ . Переменные *long* и *lat* – соответственно географические координаты: долгота и широта. Установлено, что с апреля по октябрь коэффициенты корреляции зависимости  $T = T(Z)$  находятся в интервале 0,91÷0,96. Включение в формулу  $T = T(Z)$  географических координат привело к небольшому повышению тесноты зависимостей  $T = T(Z, long, lat)$  по сравнению с  $T = T(Z)$ . Результаты использования линейных вариантов аналитического описания пространственно-временного изменения  $H$  оказались сходными с линейной одно- и трёхмерной аппроксимациями распределения температуры воздуха. Однако в отличие от  $T$ , наиболее приемлемой для пространственной экстраполяции упругости водяного пара в воздухе оказалась трёхфакторная формула  $H = H(Z \div Z^2, long, lat)$ .

Таблица 4. Результаты мониторинга ледников в бассейне р. Гунт (Памир)

| Параметры                 | $F_{gl} = 535,1 \text{ км}^2;$<br>$N_{gl} = 993$ [11] | $F_{gl} = 460,4 \text{ км}^2;$<br>$N_{gl} = 862$ [9] | Высоты, взвешенные по площади [11], м над уровнем моря |                         |                        | Высоты, взвешенные по площади [9], м над уровнем моря |                         |                        | $\dot{Z}_{med}$ |
|---------------------------|---|--|--|-------------------------|------------------------|---|-------------------------|------------------------|-----------------|
|                           |   |  | $\dot{Z}_{max} - 5280$                                 | $\dot{Z}_{mean} - 4894$ | $\dot{Z}_{min} - 4563$ | $\dot{Z}_{max} - 5281$                                | $\dot{Z}_{mean} - 4937$ | $\dot{Z}_{min} - 4593$ |                 |
| <i>Asym</i>               | 9,32  | 10,73  | -0,32  | -0,46                   | -0,57                  | -0,33   | -0,45                   | -0,41                  | -0,26           |
| $\Delta(Asym), \%$        | 0,8   | 0,8  | 24,3   | 16,8                    | 13,6                   | 25,1  | 18,6                    | 20,1                   | 31,9            |
| <i>Ex</i>                 | 124,21  | 145,08   | 0,30   | 0,66                    | 1,08                   | 0,32  | 0,99                    | 1,55                   | 1,01            |
| $\Delta(Ex), \%$          | 0,1   | 0,1  | 51,5   | 23,3                    | 14,4                   | 52,3  | 16,8                    | 10,7                   | 16,5            |
| <i>RMSD</i>               | 1,2   | 1,35   | 239,8  | 205,2                   | 240,9                  | 230,5   | 199,2                   | 220,8                  | 203,6           |
| mean                      | 0,57  | 0,53   | 5081   | 4873                    | 4678                   | 5103  | 4910                    | 4718                   | 4901            |
| $\Delta(\text{mean}), \%$ | 6,9   | 8,6  | 0,1  | 0,1                     | 0,2                    | 0,2   | 0,1                     | 0,2                    | 0,1             |
| min                       | 0,02  | 0,05   | 4100   | 3940                    | 3400                   | 4272  | 4075                    | 3485                   | 4133            |
| max                       | 19,6  | 21,79  | 5780   | 5490                    | 5400                   | 5764  | 5602                    | 5492                   | 5659            |
| med                       | 0,24  | 0,22   | 5100   | 4910                    | 4720                   | 5126  | 4930                    | 4739                   | 4912            |

Условные обозначения см. в табл. 2.

В целом на территории Центральной Азии для девяти из 12 месяцев года высота местности служит основным аргументом однофакторной зависимости  $P = P(Z)$  для описания распределения норм осадков. Теснота линейных связей  $P = P(Z, long, lat)$  в январе–декабре существенно лучше по сравнению с  $P = P(Z)$ . Если же в трёхмерной аппроксимации для  $P$  высоту местности  $z$  ввести как нелинейный член, то в результате мы получим формулу, вполне пригодную для пространственно-временной экстраполяции осадков. Определены также опорные метеостанции для пространственной экстраполяции температуры воздуха и осадков. Таким образом, методы, изложенные в работах [19, 20], в принципе пригодны для оценки климатической однородности отдельных частей речного бассейна/региона с целью обоснования пространственной экстраполяции локальных измерений баланса массы ледников на рассматриваемой территории. Практическая реализация этих методов зависит от наличия соответствующих климатических данных во всём диапазоне высот речных бассейнов.

**Характеристики динамического состояния ледников.** Несомненно, что, помимо климатических условий территории, величина удельного годового баланса массы прямо и/или косвенно зависит от площади ледника  $F_{gl}$  и разности высот  $dZ_{gl} = Z_{max} - Z_{min}$ , но, разумеется, не только от этих характеристик. В частности, заслуживает внимания такая косвенная характеристика баланса массы, как отношение площади аккумуляции к площади ледника — англоязычная аббревиатура *AAR* (accumulation area ratio). Отношение *AAR* нетрудно определить по данным из работы [11]. В результа-

те построения гистограмм распределения *AAR* для совокупностей ледников в нескольких речных бассейнах Памира установлено неравномерное смещение на гистограммах *AAR* в сторону больших либо меньших значений от центра распределения при *AAR* равном 0,50. Это важное свойство характеризует связь между балансом массы и динамикой совокупности ледников, поскольку считается, что при *AAR* = 0,50 ледники находятся в стационарном состоянии, а при *AAR* > 0,50 или *AAR* < 0,50 соответственно в состоянии активности/наступления или отступления/деградации.

Данную особенность пространственных распределений *AAR* следует также использовать для формирования состава эмпирической выборки репрезентативных ледников относительно заданной генеральной совокупности. Другая косвенная характеристика динамики оледенения — ледниковый коэффициент  $k_{gl}$ , равный отношению площади областей аккумуляции  $f_{ac}$  и абляции  $f_{ab}$ , т.е.  $k_{gl} = f_{ac}/f_{ab}$ . Коэффициенты  $k_{gl}$  и *AAR* связаны между собой выражением  $k_{gl} = AAR F_{gl}/f_{ac}$ . В работе [18] отмечено, что различия в распределении площади  $F_{gl}$  характеризуют также особенности многолетнего режима ледникового стока в масштабе речных бассейнов и время добегания талой ледниковой воды до гидрологического створа. Построение для ледников в бассейне р. Кызылсу западная распределений  $k_{gl}$  и *AAR* в полулогарифмической системе координат показало, что оба распределения имеют почти одинаковую форму с очень близкими значениями числа случаев в соответственных интервалах по оси абсцисс.

К числу характеристик динамического состояния индивидуальных ледников относятся также средние значения: толщины  $H_{gl}$ , равной частному от деления объёма ледника  $V_{gl}$  на его площадь, т.е.  $H_{gl} = V_{gl}/F_{gl}$ ; ориентации  $A_{gl}$ ; уклона поверхности  $S_{gl}$ . Объём ледника рассчитан по эмпирической формуле  $V_{gl} = F(F_{gl})$ , предложенной в работе [21]. Кроме того, для каждого ледника на территории бывшего СССР в Каталогах [5–7] и других томах приведены условные индексы  $C_{gl}$  морфологических типов ледников: 51 – дендритовый, 52 – сложно-долинный, 53 – долинный, 63 – карово-долинный, 64 – каровый, 37 – плоских вершин, 76 – кратерный, 65 – висячий, 67 – склоновый, 75 – присклоновый.

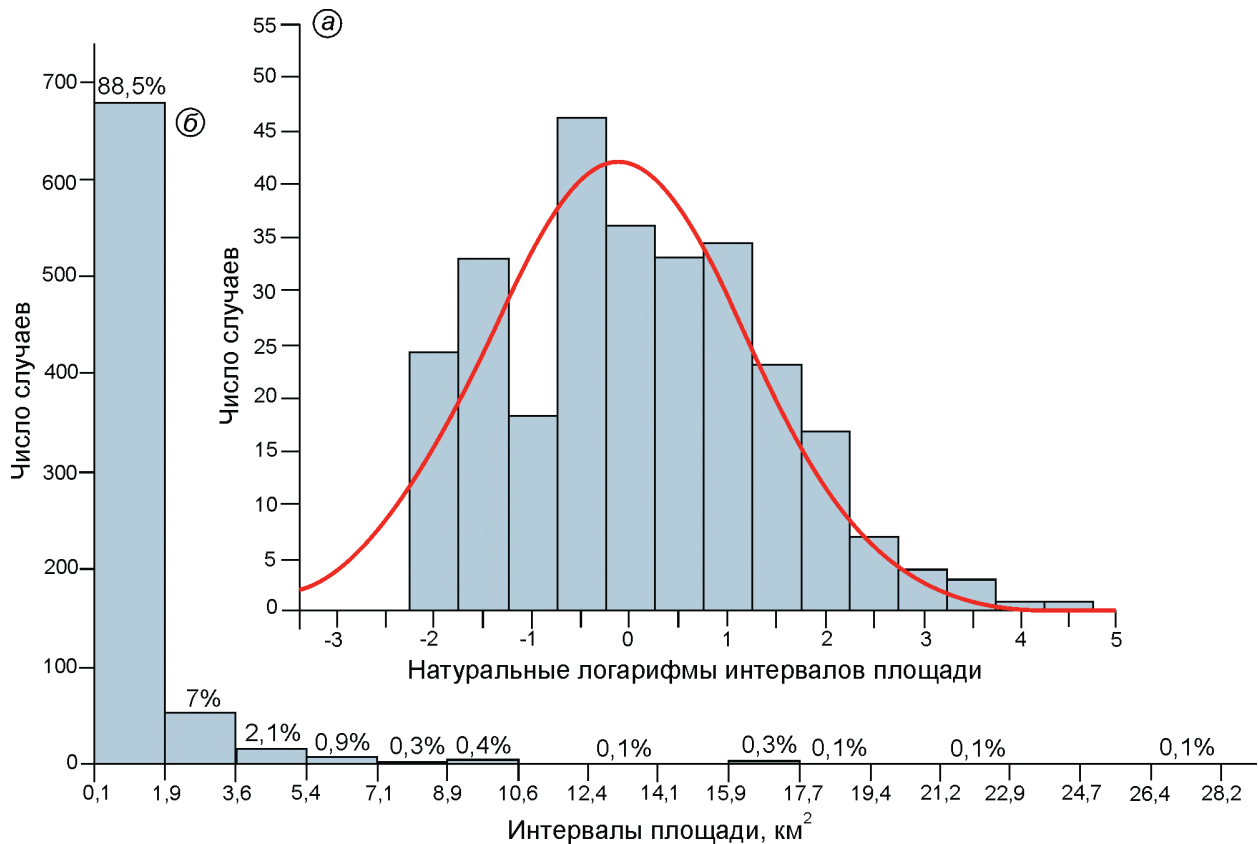
Таким образом, исходная информация, подготовленная для идентификации выборки репрезентативных ледников в речных бассейнах, включает в себя следующие семь характеристик:  $F_{gl}$ ,  $dZ_{gl}$ ,  $V_{gl}$ ,  $C_{gl}$ ,  $H_{gl}$ ,  $S_{gl}$ ,  $A_{gl}$ . Все параметры, кроме  $F_{gl}$  и  $A_{gl}$ , получены в результате обработки данных Каталога ледников СССР. Здесь и далее прописная буква перед нижним индексом в условных обозначениях параметров служит признаком соответствующего множества данных, строчная буква в аналогичных случаях обозначает характеристику индивидуальных ледников.

### Формирование выборки репрезентативных ледников

**Методика.** Определение состава ограниченной выборки ледников в качестве репрезентативного портрета для заданной совокупности в целом основано в общем случае на построении гистограммы числа ледников  $N_{gl}$ , распределённых по нескольким интервалам/категориям, охватывающим весь диапазон площади оледенения. В предельных случаях число интервалов изменяется от единицы до множества всех ледников в рассматриваемой совокупности. В первом случае все ледники оказываются в одном интервале, во втором – в каждом интервале будет только один ледник. Оба этих варианта непригодны для решения поставленной задачи, поэтому оптимальное число интервалов/категорий  $M$  находим между указанными крайними случаями путем экспертного выбора из нескольких промежуточных вариантов распределения  $N_{gl}$ .

Форма распределения  $N_{gl}$  на рис. 1,  $a$  зависит от шага разбиения шкалы абсцисс, который в данном случае был задан как разность между максимальным и минимальным значениями натурального логарифма площади, делённой на выбранное число категорий. При построении аналогичных распределений в работе [18] ширина интервалов по оси абсцисс возрастала в геометрической прогрессии со знаменателем, равным основанию натуральных логарифмов. В итоге, для построения на всей территории бывшего СССР распределений числа ледников по площади А.Н. Кренке [18] получил 13 интервалов площади от  $\leq 0,1$  км<sup>2</sup> до 8103–22 030 км<sup>2</sup>. Разумеется, число используемых интервалов не может быть повсеместно одинаковым, поскольку, например, для интервала площади 55,0–148,4 км<sup>2</sup> в бассейнах рек Северного Кавказа, Кызылсу западной, Гунта и Катунь нет ни одного ледника. Кроме того, учитывая точность определения  $F_{gl}$ , ледники с площадью  $\leq 1,0$  км<sup>2</sup> целесообразно объединить в один интервал. В итоге получаем пять интервалов площади и менее, если продолжить объединение. Именно этот вариант с небольшим сокращением числа интервалов использован далее.

Получение  $M$  категорий распределения  $N_{gl}$  необходимо для последующей генерализации семи параметров состояния ледников в каждой  $i$ -й категории ( $i = 1, \dots, M$ ). Во всех  $i$ -х категориях, кроме числа ледников  $m$ , определяем также их общую площадь, которая необходима для расчёта генерализованных значений параметров состояния оледенения. Генерализованными считаем средние значения  $F_{gl}(i)$ ,  $V_{gl}(i)$  и средние взвешенные по площади величины  $dZ_{gl}(i)$ ,  $H_{gl}(i)$ ,  $S_{gl}(i)$ ,  $A_{gl}(i)$ ,  $C_{gl}(i)$ . Сумму нормированных указанных семи параметров в категориях распределения  $N_{gl}$  далее будем рассматривать как обобщённую характеристику состояния  $m$  ледников в  $i$ -й выборке из их совокупности, относящейся ко времени каталогизации параметров оледенения в пределах речного бассейна/региона. Идентификационным признаком в  $i$ -й категории распределения  $N_{gl}$  принята средняя площадь ледников  $m$ , вошедших в  $i$ -ю категорию. С помощью этого признака выбираем из всех пронумерованных ледников в конкретном Каталоге случаи равенства или существенных различий между  $F_{gl}(i)$  и  $F_{gl}$ . Для каждого из выбранных таким способом  $\mu$  ледников находим сумму нормированных семи параметров



**Рис. 1.** Гистограммы распределения числа ледников  $N_{gl}$  в речных бассейнах: *a* – р. Кызылсу западная (гидропост Домбрачи, Памир); красная линия соответствует нормальному распределению; *б* – р. Катунь (гидропост Сростки, Алтай); для интервалов  $F_{gl}$  на оси абсцисс приведён процент от общего числа случаев  
**Fig. 1.** Histograms of the distribution of the number of glaciers  $N_{gl}$  in river basins. *a* – r. Western Kyzylsu (hp Dombrachi, Pamir); the red line corresponds to the normal distribution; *б* – r. Katun (hp Srostki, Altai); for  $F_{gl}$  intervals on the abscissa axis, a percentage of the total number of cases is given

состояния, и тогда критерием выбора  $n$  репрезентативных ледников в  $i$ -й категории будет служить экспертная оценка допустимой разницы между суммой нормированных генерализованных параметров и последовательными суммами нормированных параметров  $\mu$  единичных ледников.

В работе [19] показано, что использование среднего взвешенного значения для интервального ряда функции обеспечивает её корректную экстраполяцию в диапазоне от минимального до максимального значений аргумента. И это свойство средних взвешенных характеристик состояния ледников служит одним из общих методических принципов при определении состава выборки  $r_{gl}$  репрезентативных ледников в  $M$  категориях распределения  $N_{gl}$  и в целом  $R_{gl}$  для заданного оледенения. Выборка  $R_{gl}$  формируется путём сложения установленных репрезентативных ледников  $r_{gl}$  во всех  $i$ -х категориях распределения  $N_{gl}$ .

С целью оптимизации процесса выбора репрезентативных ледников в бассейне р. Кызылсу западная начальное число интервалов  $dF$  (категорий) площади, как видно из табл. 5, было сокращено до трёх ( $i = 3$ ). В качестве нормативных характеристик семи параметров динамического состояния всех  $m$  ледников в каждом из принятых трёх интервалов  $dF$  были получены средние значения  $\bar{U}(k)$  и средние взвешенные по площади  $\tilde{U}(k)_{F_{gl}(i)}$ , нормированные  $\tilde{U}(k)$  по  $\bar{U}(k)$  и  $\hat{Y}$  – сумма нормированных значений  $\tilde{U}(k)$  по  $\bar{U}(k)$ ,  $k = 1, \dots, 7$ :

$$\hat{Y}(i) = \sum_{k=1}^n \tilde{U}(k) / \bar{U}(k). \quad (2)$$

Все перечисленные характеристики приведены в табл. 5. Затем средняя площадь  $\bar{U}_i = F_{gl}(i) / N_{gl}(i)$  в категориях  $dF$  была использована для выделения из всех  $m$  ледников ограниченной под-выборки  $\mu$  случаев равенства или незначительной разни-



Таблица 5. Сводная информация для определения выборки репрезентативных ледников в бассейне р. Кызылсу западная\*

| Параметры                                   | $dF = 0 \div 3,0 \text{ км}^2; m = 229, n = 4$ |                        |                 |              |          |         | $dF = 3,0 \div 6,0 \text{ км}^2; m = 31, n = 2$ |              |                        |         | $dF > 6,0 \text{ км}^2; m = 20, n = 3$ |                 |      |      |      |
|---|--|------------------------|-----------------|--------------|----------|---------|---|--------------|------------------------|---------|--|-----------------|------|------|------|
|   | $\bar{U}$                                      | Нормированные значения |                 |              |          |         |   | $\bar{U}$    | Нормированные значения |         |  |                 |      |      |      |
|   |  | $\hat{Y}$              | Номера ледников |              |          |         | $\hat{Y}$                                       |              | Номера ледников        |         | $\hat{Y}$                              | Номера ледников |      |      |      |
|   |  |                        | 123             | 146          | 181      | 206     |   |              | 235                    | 269     |  | 152             | 215  | 138  |      |
| Площадь $F_{gl}$ , км <sup>2</sup>          | 0,87   | 1,00                   | 1,03            | 1,03         | 1,03     | 1,03    | 4,28  | 1,00         | 0,98                   | 1,00    | 15,77                                  | 1,00            | 1,07 | 0,79 | 1,12 |
| Объём $V_{gl}$ , км <sup>3</sup>            | 0,039  | 1,87                   | 0,51            | 0,51         | 0,51     | 0,51    | 0,244   | 1,04         | 0,93                   | 0,96    | 1,243                                  | 1,77            | 0,57 | 0,40 | 0,61 |
| Условные классификационные индексы $C_{gl}$ | 59   | 0,95                   | 0,94            | 0,94         | 1,14     | 0,94    | 53  | 1,00         | 1,00                   | 1,00    | 53                                     | 1,00            | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Разность высот $dZ_{gl}$ , м                | 564  | 1,41                   | 1,30            | 0,86         | 0,88     | 1,06    | 1190  | 1,00         | 1,16                   | 1,26    | 1933                                   | 1,17            | 1,04 | 0,98 | 0,97 |
| Толщина $H_{gl}$                            | 38   | 1,16                   | 0,93            | 0,93         | 0,93     | 0,93    | 56  | 1,01         | 0,99                   | 1,00    | 55                                     | 1,00            | 1,02 | 1,00 | 1,02 |
| Ориентация (азимут) $A_{gl}$                | 198  | 1,04                   | 0,22            | 1,76         | 0,44     | 1,76    | 226   | 0,98         | 1,42                   | 1,42    | 277                                    | 0,84            | 1,35 | 1,54 | 1,54 |
| Уклон $S_{gl}$ , градусы                    | 21   | 0,96                   | 2,14            | 1,04         | 1,69     | 0,90    | 22  | 0,98         | 1,48                   | 2,02    | 24                                     | 1,00            | 1,33 | 1,08 | 0,68 |
| Сумма                                       |  | <b>8,4</b>             | 7,1             | 7,1          | 6,6      | 7,1     |   | <b>7,0</b>   | 8,0                    | 8,7     |  | <b>7,8</b>      | 7,4  | 6,8  | 6,9  |
|   | $m = 229$                                      | $n = 4$                | $\Delta$ , мм   | $\Delta$ , % | $m = 31$ | $n = 2$ | $\Delta$ , мм                                   | $\Delta$ , % | $m = 20$               | $n = 3$ | $\Delta$ , мм                          | $\Delta$ , %    |      |      |      |
| $M_1(Z_{mean})_m / M_1(Z_{mean})_n$ , мм    | 2436   | 2262                   | 174             | 7,2          | 2521     | 2607    | 86  | 3,4          | 1113                   | 826     | 287                                    | -25,8           |      |      |      |
| $M_2(Z_{mean})_m / M_2(Z_{mean})_n$ , мм    | 1361   | 1269                   | 92              | 6,8          | 1408     | 1453    | 45  | 3,2          | 619                    | 444     | 175                                    | -28,2           |      |      |      |

\* $dF$  – размер интервала на оси абсцисс в распределении числа ледников;  $m$  – число ледников в интервале;  $n$  – число репрезентативных ледников в интервалах  $dF$ ;  $\bar{U}$  – символ среднего; в графе  $\hat{Y}$  приведены средние взвешенные характеристики семи параметров состояния, нормированные по величинам из графы  $\bar{U}$ . В графе номера ледников приведены параметры состояния для индивидуальных ледников, нормированные по значениям из графы  $\hat{Y}$ ;  $M_1(Z_{mean})_m$  и  $M_1(Z_{mean})_n$  – соответственно рассчитанный за июнь–август слой таяния в мм на высоте  $Z_{mean} = (Z_{max} + Z_{min})/0,5$  для выборки  $m/n$  ледников;  $M_2(Z_{mean})_m$  и  $M_2(Z_{mean})_n$  – результаты расчёта по формуле (7);  $\Delta$  – разность в мм и процентах между  $M(Z_{mean})_m$  и  $M(Z_{mean})_n$ .

цы между  $\bar{U}_i$  и  $F_{gl}(m)$ . Из числа  $\mu$  в качестве репрезентативных в категориях  $dF$  выбраны ледники с допустимой разницей между суммой нормированных семи параметров единичных ледников и генерализованными значениями  $\hat{Y}(i)$ , рассчитанными по формуле (2). Эти ледники перечислены в табл. 5 в графе «Номера ледников».

В случае прямых измерений годового/сезонного баланса массы по методике *WGMS* на всех  $n$  ледниках в заданных интервалах  $dF$  находим среднее взвешенное по площади значение баланса массы для рассматриваемого речного бассейна. Столь же обоснованные результаты могут быть получены при использовании расчётного, а также геодезического методов для определения годового баланса массы на установленной апостериори выборке репрезентативных ледников № 123, 146, 181, 206, 235, 269, 152, 215 и 138 в бассейне р. Кызылсу западная (см. табл. 5). Основой для аналогичной идентификации репрезентативных ледников в целом для бассейна р. Катунь послужило распределение  $N_{gl}$  по  $F_{gl}$ , представленное на рис. 1, б. Итоговые результаты определения выборок репрезентативных ледников в заданных категориях распределения ледников в бассейне р. Катунь приведены в табл. 6,

которая по формату и составу информации адекватна табл. 5 для бассейна р. Кызылсу западная.

### Некоторые оценки качества данных и расчётов

Есть основания считать, что отклонение какого-либо нормированного параметра в табл. 5 и 6 (графа «Номера ледников») от его среднего взвешенного значения, помимо влияния пространственного изменения характеристик состояния оледенения, могут быть обусловлены качеством исходных данных в Каталогах ледников. Безусловно, это относится к величинам уклонов поверхности ледников, которые в ряде случаев выглядят маловероятными. Например, в Каталоге [6] в 233 случаях из 696 рассчитанный уклон поверхности ледников в бассейне р. Катунь превысил 40°, а в 83 случаях составил более 60°. Оценки аналогичного параметра для бассейна р. Кызылсу западная, по данным Каталога [7], оказались следующими: уклон поверхности ледников в 148 случаях из 280 превысил 40° и оказался более 60° в 102 случаях. При этом в обоих бассейнах немало значений уклона находилось в интервале 85–90°. Помимо рассмотренного параметра, как показал

Таблица 6. Сводная информация для определения выборки репрезентативных ледников в бассейне р. Катунь

| Параметры                                   | $dF = 0 \div 1,90 \text{ км}^2; m = 696, n = 6$ |                        |                 |               |              |          |         |               | $dF = 1,90 \div 7,1 \text{ км}^2; m = 70, n = 3$ |                        |                 |               |              | $dF > 7,1 \text{ км}^2; m = 11, n = 2$ |                        |                 |      |
|---|---|------------------------|-----------------|---------------|--------------|----------|---------|---------------|--|------------------------|-----------------|---------------|--------------|--|------------------------|-----------------|------|
|   | $\bar{U}$                                       | Нормированные значения |                 |               |              |          |         |               | $\bar{U}$  | Нормированные значения |                 |               |              | $\bar{U}$                              | Нормированные значения |                 |      |
|   |   | $\hat{Y}$              | Номера ледников |               |              |          |         |               |  | $\hat{Y}$              | Номера ледников |               |              |  | $\hat{Y}$              | Номера ледников |      |
|   |   |                        | 4173            | 6033          | 6049         | 5344     | 5147    | 5398          |  |                        | 4182            | 5333          | 6077         |  |                        | 5391            | 4205 |
| Площадь $F_{gl}$ , км <sup>2</sup>          | 0,49  | 1,00                   | 1,02            | 1,02          | 1,02         | 1,02     | 1,02    | 1,02          | 3,40   | 1,00                   | 0,97            | 0,97          | 0,97         | 14,87                                  | 1,00                   | 0,89            | 0,70 |
| Объём $V_{gl}$ , км <sup>3</sup>            | 0,019   | 1,93                   | 0,94            | 0,94          | 0,94         | 0,94     | 0,94    | 0,94          | 0,187  | 1,20                   | 0,79            | 0,79          | 0,79         | 1,112                                  | 1,21                   | 0,70            | 0,53 |
| Условные классификационные индексы $C_{gl}$ | 63  | 0,99                   | 1,02            | 1,04          | 1,04         | 1,00     | 1,04    | 1,04          | 56   | 0,99                   | 0,95            | 0,95          | 0,95         | 54                                     | 0,99                   | 0,99            | 0,99 |
| Разность высот $dZ_{gl}$ , м                | 480   | 1,20                   | 0,77            | 1,33          | 1,58         | 1,69     | 1,04    | 1,46          | 980  | 1,06                   | 0,90            | 1,24          | 0,81         | 1701                                   | 0,96                   | 1,46            | 1,42 |
| Толщина $H_{gl}$                            | 34  | 1,00                   | 1,07            | 1,07          | 1,07         | 1,07     | 1,07    | 1,07          | 53   | 0,99                   | 0,96            | 0,96          | 0,96         | 72                                     | 1,04                   | 1,04            | 0,99 |
| Ориентация (азимут) $A_{gl}$                | 239   | 0,90                   | 1,51            | 1,51          | 1,13         | 1,51     | 1,51    | 1,13          | 194  | 1,00                   | 1,62            | 1,85          | 0,46         | 233                                    | 1,00                   | 0,19            | 1,55 |
| Уклон $S_{gl}$ , градусы                    | 36  | 0,98                   | 1,99            | 0,86          | 1,11         | 0,93     | 1,15    | 1,13          | 17   | 0,99                   | 1,01            | 1,44          | 0,88         | 13                                     | 0,97                   | 1,02            | 1,34 |
| Сумма                                       |   | <b>8,01</b>            | 8,32            | 7,77          | 7,89         | 8,16     | 7,77    | 7,78          |  | <b>7,23</b>            | 7,19            | 8,20          | 5,82         |  | <b>7,17</b>            | 6,30            | 7,51 |
|   |   | $m = 696$              | $n = 6$         | $\Delta$ , мм | $\Delta$ , % | $m = 70$ | $n = 3$ | $\Delta$ , мм | $\Delta$ , %                                     | $m = 11$               | $n = 2$         | $\Delta$ , мм | $\Delta$ , % |  |                        |                 |      |
| $M_1(Z_{mean})_m/M_1(Z_{mean})_n$           |   | 1832                   | 1672            | -160          | 8,7          | 1716     | 1662    | -54           | 3,1  | 1597                   | 1531            | -66           | 4,2          |  |                        |                 |      |
| $M_2(Z_{mean})_m/M_2(Z_{mean})_n$           |   | 2120                   | 1843            | -277          | 13,6         | 1926     | 1828    | -98           | 5,1  | 1694                   | 1562            | -132          | 7,8          |  |                        |                 |      |

Условные обозначения см. в табл. 5.

анализ [15], ряд результатов определения площади ледников в Каталоге [5] требует корректировки из-за несоответствия многолетней динамике оледенения в бассейнах рек на Северном Кавказе.

Наглядными оценками качества разработанного метода служат абсолютная и относительная разности между результатами расчёта суммарного слоя таяния за лето  $M_S$  и за год  $M_Y$  на средней высоте ледников  $Z_{mean}$ , полученные по всей совокупности данных  $M(m)$  по сравнению с  $M(n)$ , когда были использованы данные репрезентативной выборки. Итоги соответствующих расчётов  $M_Y$  как функции  $T_S$  – средней летней температуры воздуха, т.е.  $M_Y = f(T_S(Z_{mean}))$  для бассейнов рек Кызылсу западная и Катунь  $M_S = f(T_S(Z_{mean}))$  приведены в табл. 5 и 6. Определение средних взвешенных слоёв  $M_Y(m)$  и  $M_Y(n)$  на ледниках в бассейне р. Кызылсу западная выполнено с помощью выражения (3), полученного ранее в [22], и формулы (4):

$$\bar{T}_S(z)_{\text{Кызылсу}} = 29,02 - 6,16z; \tag{3}$$

$$M_Y(z)_{\text{Кызылсу}} = 54,1\bar{T}_S(z)^2 + 471,2\bar{T}_S(z) + 1458,7, \tag{4}$$

где  $\bar{T}_S$  – многолетняя норма средней летней температуры воздуха;  $z$  – высота в км над ур. моря.

Коэффициент детерминации в (3), (4) соответственно равен 0,82 и 0,96. Среднеквадратичная ошибка расчёта  $\bar{T}_S(z)$  и  $M_Y(z)$  – 3,7 °C/лето в диапазоне от -11,9 °C до 35 °C (19,7%) и 328 мм/год в диапазоне от 181 до 5230 мм,

или 17%. Формула (4) разработана автором статьи по многолетним данным из исследований [14, 23] о температуре воздуха на высоте 3840 м и годовой удельной абляции на леднике Абрамова в 11 интервалах высоты. Максимальная высота измерений абляции на леднике Абрамова – 4,65 км. Измеренные средние летние температуры воздуха находятся в диапазоне 2,3–4,8 °C. Поскольку высота  $Z_{mean}$  на ледниках в бассейне р. Кызылсу западная изменяется от 3,80 до 5,47 км, потребовалась формула для расчёта абляции, пригодная в таких условиях. С этой целью выполнена экстраполяция измерений на леднике Абрамова абляции до высоты 4,90 км, а средней летней температуры воздуха – до 4,85 и 4,90 км и по этим данным получена формула (4).

Для расчёта средних взвешенных слоёв  $M_S(m)$  и  $M_S(n)$  на ледниках в бассейне р. Катунь использованы формулы (5) и (6) из работы [24]:

$$\bar{T}_S(z)_{\text{Катунь}} = \bar{T}_S(z_0) - 0,0045(z - z_0); \tag{5}$$

$$M_S(z)_{\text{Катунь}} = (-145,0/(-11,09 + \bar{T}_S(z)) \cdot 92, \tag{6}$$

где  $\bar{T}_S(z_0)$  – многолетняя норма средней летней температуры воздуха на метеостанции Каратюрек;  $z_0$  – абсолютная высота метеостанции Каратюрек, м; размерность  $z$ , м.

В формуле (6) размерность  $M_S$  – мм/лето. Коэффициент детерминации (5), (6) соответственно равен 0,91 и 0,50. Установлена пригодность выражения (6) в диапазоне средней летней темпе-

ратуры воздуха от 8 °С до любой отрицательной температуры воздуха, которая возможна летом на ледниках Алтая. Для получения формулы (6) использована зависимость  $T_S = T(z)$  по данным [12] измерения средней летней температуры воздуха на 21 метеостанции в бассейне р. Катунь на высотах 0,40–2,97 км. Коэффициент детерминации зависимости  $T_S = T(z) - 0,92$ ; среднеквадратичная ошибка расчёта равен 1,4 мм/лето (10,5%); среднеквадратичная ошибка расчёта по формуле (6) составляет 7,6 мм/сут. (22,5%).

Для дополнительного контроля репрезентативности установленных выборок  $n$  ледников в диапазонах площади  $dF$  в табл. 5 и 6 включены также результаты расчёта годовой абляции по глобальной формуле (7) из работы [18]:

$$Ab = 1,33(\bar{T}_S + 9,66)^{2,85}. \quad (7)$$

Коэффициент детерминации и среднеквадратичная ошибка расчёта для формулы (7) в работе [18] не приведены.

Судя по приведённым в табл. 5 и 6 относительным разностям между величинами  $M(m)$  и  $M(n)$  для ледников в бассейнах рек Кызылсу западная и Катунь, применение выборок  $n$  репрезентативных ледников обеспечивает вполне удовлетворительное качество расчёта годового/летнего таяния в целом для  $m$  ледников в грациях распределения числа ледников по площади. При этом сами величины  $M(m)$  и  $M(n)$ , рассчитанные по локальным формулам (4), (6) и глобальной формуле (7), в большинстве случаев заметно отличаются одна от другой. Это обусловлено различием исходной информации, на основе которой получены формулы (4), (6) и (7). Практический вывод о приемлемости  $M(m)$  и  $M(n)$  как её репрезентативного аналога можно сделать только после их использования в расчётах ледникового стока в качестве компонента уравнения водного баланса речного бассейна. Решение этой задачи не входит в настоящую работу.

### Гидрологическая репрезентативность ледников

Ещё одна практически важная задача нашей работы – выявление возможностей использования локальных значений  $Ab/B_s$ , измеренных на априори опорных/репрезентативных ледниках в базе данных  $WGMS$ , в качестве дополни-

тельного аргумента при моделировании и расчётах речного стока в масштабе речных бассейнов за июнь–сентябрь. Этот интервал времени выбран как наиболее типичный при формировании большей части объёма ледникового питания рек. Все высокогорные водосборы, независимо от размеров площади и отношения  $F_{gl}/F_{bas}$ , где объём таяния сезонного снега и многолетних запасов льда в ледниках вносит преобладающий вклад в водные ресурсы апреля–сентября, считаем относящимися к категории речных бассейнов снего-ледникового типа формирования стока. Такая трактовка рассматриваемого термина охватывает все потенциальные случаи оценки гидрологической репрезентативности ледников. Возможный вклад жидких осадков в формирование стока в средне- и низкогорных областях речных бассейнов не имеет отношения к гидрологической репрезентативности ледников.

### Методика

Анализ и решение поставленной в разделе задачи основаны на оценке вклада баланса массы  $B_s$  в качестве потенциального аргумента уравнения множественной линейной регрессии для расчёта стока рек за июнь–сентябрь. Для исследования использованы речные бассейны, расположенные на Северном Кавказе, Памиро-Алае и Алтае (табл. 7). Модель речного стока  $W_{bas}$  принята в виде функции линейной регрессии осадков  $P$  и температуры воздуха  $T$ , т.е.  $W_{bas} = f(P, T)$ , где оба аргумента охватывают определённые характерные интервалы времени. В этой комбинации независимых переменных сезонная температура воздуха  $T$  рассматривается как показатель талой составляющей речного стока. В качестве численного обоснования решения задачи применён многофакторный линейный регрессионный анализ, который включает в себя расчёт по Г.А. Алексею [25] относительного вклада  $\delta$  независимых переменных  $T$ ,  $P$  и  $B_s$  в описание дисперсии стока  $W_{bas}$ . Общий вид формулы для оценки детерминированного вклада  $\delta$  независимой переменной номер 1 таков:

$$\delta_1 = r_{01}^2 / (r_{01}^2 + r_{02}^2 + r_{03}^2), \quad (8)$$

где  $r_{01}^2$  – квадрат парного коэффициента корреляции между функциями, обозначенной как 0, и независимой переменной номер 1.

Таблица 7. Вклады осадков, температуры воздуха, абляции или летнего баланса массы ( $Ab/B_s$ ) на ледниках Актру, Джанкуат и Абрамова в уравнения для расчёта стока за июнь–сентябрь\*

| Река   | Гидропост      | $F_{bas}$ , км <sup>2</sup> | $F_{gl}$ , км <sup>2</sup> [5, 6] | $F_{gl}$ , км <sup>2</sup> [8, 9] | Три аргумента    |          |               | Четыре аргумента |               |
|--|----------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------|----------|---------------|------------------|---------------|
|  |                |                             |                                   |                                   | $R(Q_{vi-ix})_3$ | $\eta P$ | $\eta(T/B_s)$ | $R(Q_{vi-ix})_4$ | $\eta(T/B_s)$ |
| <i>Бассейн р. Катунь (Алтай)</i>                         |                |                             |                                   |                                   |                  |          |               |                  |               |
| Катунь   | Сростки        | 58 400                      | 738,9                             | 524,7                             | 0,82             | 1,00     | 0,00          | 0,82             | 0,00/0,05     |
| Катунь   | АКТ            | 14 199                      | 170,2                             | 118,6                             | 0,76             | 0,85     | 0,00/0,15     | 0,77             | 0,00/0,21     |
| Чуя  | Белый Бом      | 10 900                      | 232,2                             | 170,1                             | 0,65             | 1,00     | 0,00          | 0,67             | 0,04/0,00     |
| Актру  | Актру          | 36,0                        | 31,0                              | 28,9                              | 0,84             | 0,03     | 0,00/0,97     | 0,84             | 0,00/0,96     |
| <i>Бассейны рек на Северном Кавказе</i>                  |                |                             |                                   |                                   |                  |          |               |                  |               |
| Терек  | Владикавказ    | 1 490                       | 66,6                              | 46,0                              | 0,72             | 1,00     | 0,00          | 0,76             | 0,00          |
| Терек  | Котляревская   | 8 920                       | 685,6**                           | 637,6                             | 0,72             | 1,00     | 0,00          | 0,74             | 0,00          |
| Малка  | Проходная      | 2 860                       | 189,5**                           | 174,3                             | 0,68             | 1,00     | 0,00          | 0,69             | 0,00          |
| Баксан   | Заюково        | 2 100                       | 154,2                             | 140,2                             | 0,71             | 0,85     | 0,15/0,00     | 0,75             | 0,48/0,00     |
| Чегем  | Нижний Чегем   | 739                         | 59,3                              | 49,5                              | 0,84             | 0,51     | 0,49/0,00     | 0,88             | 0,45/0,00     |
| Черек  | Советский      | 1 350                       | 198,1                             | 152,2                             | 0,72             | 0,15     | 0,85/0,00     | 0,73             | 0,86/0,00     |
| Теберда  | Теберда        | 504                         | 57,6                              | 48,2                              | 0,70             | 0,27     | 0,73/0,00     | 0,73             | 0,00/0,00     |
| Малка  | Каменноостское | 1 540                       | 57,3                              | 52,3                              | 0,73             | 1,00     | 0,00          | 0,76             | 0,00/0,00     |
| <i>Бассейны рек на северных склонах Алайского хребта</i> |                |                             |                                   |                                   |                  |          |               |                  |               |
| Исфара   | Ташкуртан      | 1560                        | 125,0                             | 116,4                             | 0,81             | 0,17     | 0,83/0,00     | 0,82             | 0,82/0,00     |
| Сох  | Сарыканда      | 2480                        | 240,5                             | 272,6                             | 0,92             | 0,35     | 0,65/0,00     | 0,94             | 0,72/0,00     |
| Шахимардан   | Джидалик       | 1180                        | 30,1                              | 43,0                              | 0,76             | 0,47     | 0,53/0,00     | 0,80             | 0,66/0,00     |
| Исфайрам   | Учкоргон       | 2200                        | 66,5                              | 68,6                              | 0,74             | 0,71     | 0,29/0,00     | 0,80             | 0,76/0,00     |
| Акбура   | Папан          | 2200                        | 63,5                              | 63,0                              | 0,82             | 0,35     | 0,17/0,49     | 0,83             | 0,22/0,49     |

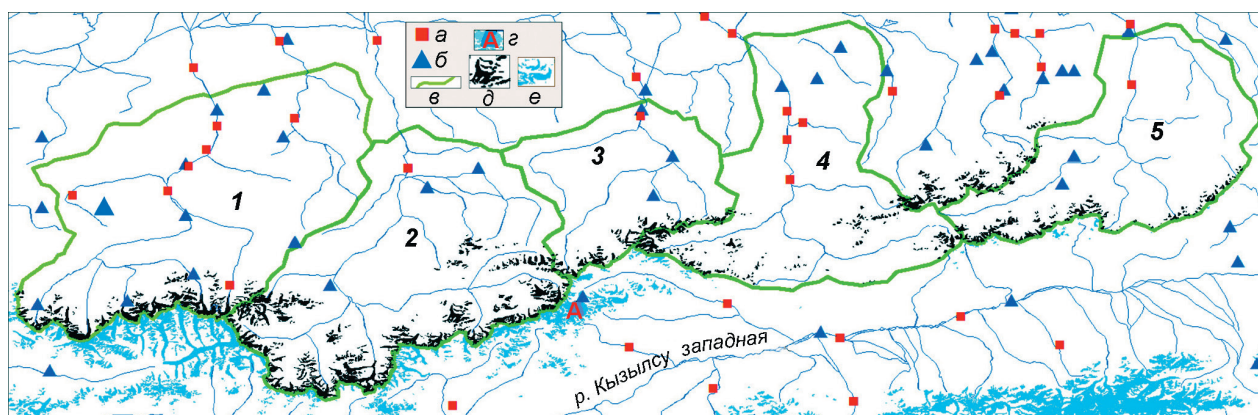
\* $F_{bas}$  – площадь бассейна до гидропоста;  $F_{gl}$  [5–7] – площадь ледников в Каталоге ледников СССР;  $F_{gl}$  [8, 9] – площадь ледников в Каталогах [8, 9] – все площади в км<sup>2</sup> до замыкающего гидропоста, кроме общей площади оледенения в бассейне (отмечено символом\*\*),  $R(Q_{vi-ix})_3$  – сводный коэффициент корреляции уравнения регрессии  $Q_{vi-ix} = f(P, T)$  для трёх или четырёх  $R(Q_{vi-ix})_4$  аргументов;  $P, T$  – соответственно сезонные суммы и средние значения осадков  $P$  и температуры воздуха  $T$  за характерные периоды;  $\eta P$  – детерминированный вклад  $P$  в описание дисперсии стока за июнь–сентябрь  $Q_{vi-ix}$ ;  $\eta T$  – то же для  $T$ . При использовании четырёх аргументов к  $P$  и  $T$  добавлена сезонная абляция  $Ab$  либо летний баланс массы  $B_s$  на ледниках Малый Актру (бассейн р. Катунь) или Джанкуат (бассейн р. Терек);  $\eta Ab/B_s$  – детерминированный вклад добавленного аргумента в описание дисперсии стока  $Q_{vi-ix}$ , АКТ – сумма стока рек Аккем, Кучерла и Катунь (гидропост Тюнгур).

Аналогично путём подстановки квадрата парной корреляции между функцией и последующими аргументами в числитель формулы (8) выполняется расчёт  $\delta$  для других переменных в правой части уравнения множественной регрессии.

Многолетние измерения баланса массы на ледниках Джанкуат, Абрамова и Малый Актру [1, 23, 26, 27] использованы при моделировании сезонного стока  $W_{bas}$  в речных бассейнах Северного Кавказа, Памиро-Алая и Алтая. Локальные измерения летнего баланса массы  $B_s$  на этих ледниках будем считать репрезентативными в масштабе речного бассейна при условии, что  $B_s$  как дополнительная независимая переменная обеспечивает увеличение коэффициента множественной линейной корреляции для уравнения  $W_{bas} = f(P, T)$ , а также, если  $B_s$  можно ис-

пользовать вместо  $T$  в уравнении  $W_{bas} = f(P, T)$ , для рассматриваемого бассейна.

После выполнения численных экспериментов с 28-летними выборками зависимых и независимых переменных установлены случаи, выделенные жирным шрифтом в табл. 7, когда эмпирические уравнения  $W_{bas} = f(P, T)$  для расчёта речного стока в июне–сентябре включали в себя данные о балансе массы  $B_s$  на одном из названных априори репрезентативных ледников. При задании независимых переменных  $P, T$ , измеренных на метеостанциях, использованы следующие интервалы времени:  $P = P(X-IV)$ ,  $T = T(VI-VIII)$ . Расположение ледника Абрамова относительно сопредельных речных бассейнов и пунктов гидрологических и метеорологических наблюдений на северном склоне



**Рис. 2.** Бассейны правых притоков р. Сырдарьи на северных склонах Алайского хребта:

1–5 – бассейны рек (в скобках после названия бассейна дана его площадь, км<sup>2</sup>, и относительная площадь оледенения, %): 1 – Исфара (1560/8,3), 2 – Сох (2480/10,2), 3 – Шахимардан (1180/4,0), 4 – Исфайрам (2200/4,6), 5 – Акбура (2200/5,0); а – гидрологические посты; б – метеостанции; в – граница речного бассейна; г – ледник Абрамова; д – ледники на северных склонах Алайского хребта; е – ледники в бассейне р. Кызылсу западная и на сопредельной территории. Источник данных по расположению ледников – Каталог RGI v. 6 [9]

**Fig. 2.** Right tributaries of the Syr Darya river on the northern slopes of the Alai range. Legend:

1–5 – river basins (in brackets after the name of the basin given its area in km<sup>2</sup> and the relative area of glaciation in %): 1 – Isfara (1560/8.3), 2 – Sokh (2480/10.2), 3 – Shakhimardan (1180/4.0), 4 – Isfayram (2200/4.6), 5 – Akbura (2200/5.0); a – hydrological posts; б – weather stations; в – boundary of river basin; г – Abramova Glacier; д – glaciers on the Northern slopes of Alay ridge; e – glaciers in the Kyzylsu western river basin and neighboring territory. Source of data on location of glaciers is the catalog RGI v. 6 [9]

Алайского хребта иллюстрирует рис. 2. Установлено, что измерения годовой абляции/летнего баланса массы на ледниках Абрамова, Малый Актру и Джанкуат можно считать регионально репрезентативными только для некоторых водосборов (см. табл. 7) в бассейнах рек Памиро-Алая, Северного Кавказа и р. Катунь (Алтай).

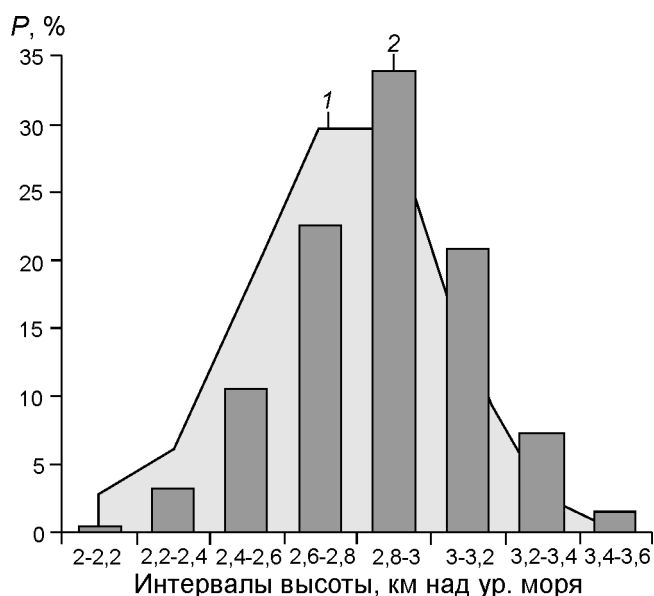
## Результаты

Экссесс, асимметрия [5–7, 11] и медиана распределений  $F_{gl}$  в [8, 9] указывают на подавляющее преобладание числа ледников с площадью  $\leq 0,5$  км<sup>2</sup>. Этот результат не подтверждает заданную априорно [1] региональную репрезентативность ледников Джанкуат ( $F_{gl} = 2,5$  км<sup>2</sup>), Абрамова ( $F_{gl} = 24,4$  км<sup>2</sup>) и Малого Актру ( $F_{gl} = 2,9$  км<sup>2</sup>) относительно рассмотренных совокупностей ледников на Северном Кавказе, Памиро-Алае и Алтае. Определены репрезентативные ледники в бассейнах рек Катунь (Алтай) и Кызылсу западная (Памир) для выполнения региональных расчётов баланса массы ледников и ледникового стока. Эти ледники не совпадают с назначенными априорно [1] для решения аналогичных задач ледниками Малый Актру и

Абрамова в базе данных WGMS. Промежуточные и конечные результаты применения предложенного метода выявления репрезентативных ледников представлены в табл. 5 и 6.

Добавление локальных величин  $Ab/B_s$  в качестве дополнительного аргумента в уравнения регрессии для региональных расчётов стока рек снегово-ледникового типа питания на Северном Кавказе, Алтае и Памиро-Алае дало статистический эффект в ограниченных случаях. Достоверность изменений  $\hat{Z}_{max}$ ,  $\hat{Z}_{min}$ ,  $\hat{Z}_{mean}$  в табл. 2–4 подтверждается согласованностью с принятой в масштабе речного бассейна линейной зависимостью между размерами ледников и средними взвешенными высотами начала, конца и средней высоты ледника. В соответствии с этой зависимостью при сокращении площади ледников происходит рост абсолютных значений  $\hat{Z}_{min}$ ,  $\hat{Z}_{mean}$  и стабильность либо возрастание  $\hat{Z}_{max}$ , а при наступании ледников – уменьшение  $\hat{Z}_{min}$ ,  $\hat{Z}_{mean}$  и увеличение/стабильность  $\hat{Z}_{max}$ .

Сравнение гистограмм распределения параметров  $dZ$  и  $AAR$ , построенных для одной и той же территории за разные интервалы времени, показало, что их форма зависит от балансового состояния совокупности ледников. Из этого следует, что состав репрезентативной выборки не



**Рис. 3.** Изменение распределения минимальной высоты ледников  $Z_{\min}$  в бассейне р. Катунь за 1946–2005 гг.

1 – распределение  $Z_{\min}$  по данным Каталога ледников СССР [6]; 2 – по данным Каталога RGI 6 [9];  $P$  – доля  $Z_{\min}$  в Каталогах [6, 9] для одинаковых интервалов высоты, %

**Fig. 3.** Changes in the distribution of minimal altitude of glaciers  $Z_{\min}$  in the Katun river basin for 1946–2005.

1 – distribution of  $Z_{\min}$  according to the data of Glacier Inventory [6]; 2 – according to the data in Catalog RGI 6 [4];  $P$  – is the share of  $Z_{\min}$  in the Catalogues [6, 9] for the same height intervals, %

может быть постоянным и должен изменяться со временем в соответствии с тенденцией динамики оледенения на рассматриваемой территории. Сделанный вывод заслуживает соответствующего количественного подтверждения. Тем не менее полагаем, что общее свойство постоянной системы измерений – её неадекватность изменяющимся во времени характеристикам природных процессов. Кроме того, один и тот же состав выборки данных по балансу массы ледников [1] не отражает временного изменения по разным причинам (см. табл. 1–4) размера генеральных совокупностей в целом или по частям на одной и той же территории.

Основные результаты выполненной работы – общая методика оценки пространственной репрезентативности отдельных ледников и определение состава эмпирической выборки ледников как аналога соответствующей генеральной совокупности. Применение метода состоит из трёх основных этапов: 1) построение

гистограммы распределения числа ледников по интервалам (категориям) площади; 2) определение средних взвешенных по площади и суммы нормированных значений семи параметров динамического состояния оледенения в каждом интервале; 3) отбор из всех ледников в каждой категории числа случаев с допустимой разницей между суммой нормированных параметров в целом для категории и суммой нормированных параметров индивидуальных ледников.

Идентифицированные этим способом ледники считаем статистически репрезентативными по сумме параметров состояния в заданных категориях распределения числа ледников  $N_{gl}$ . А общее число выбранных ледников в речном бассейне/регионе составит искомую неслучайную эмпирическую выборку для использования в качестве приближённого аналога соответствующей генеральной совокупности.

## Заключение

1. По данным Каталогов ледников [5–11] впервые получен обширный набор статистических параметров для совокупностей ледников на Северном Кавказе, Памиро-Алае и Алтае и оценено их изменение в течение 1946–2005 гг. В этих регионах установлено изменение  $\hat{Z}_{\max}$ ,  $\hat{Z}_{\min}$ ,  $\hat{Z}_{\text{mean}}$  в 2000–2013 гг. относительно их значений в 1960–1967 гг., что отражается на условиях формирования ледникового стока. На ледниках в бассейне р. Катунь к 2011–2013 гг. увеличилось число случаев повышенных значений параметра  $Z_{\min}$ , начиная с интервала высоты 2,8–3,0 км над ур. моря (рис. 3).

2. Надёжными, отвечающими тенденции сокращения площади оледенения на Алтае и Северном Кавказе и пригодными для гидрологических расчётов, служат средние взвешенные высоты  $\hat{Z}_{\max}$ ,  $\hat{Z}_{\min}$ ,  $\hat{Z}_{\text{mean}}$  совокупностей ледников. Для интервала времени 1946–1975 гг. они были получены из [5–7, 11], а для 1976–2005 гг. – в результате мониторинга колебаний размеров ледников со спутников *TERRA* и *LANDSAT+* [8–10].

3. Гидрологическая репрезентативность ледника – новая характеристика, имеющая практическое значение для решения задач гидрологии и гляциологии в масштабе речных бассейнов

снего-ледникового типа формирования стока. В таких бассейнах чаще всего используется параметризация процесса стока  $W_{bas}$  с помощью уравнений множественной линейной регрессии типа  $W_{bas} = f(P, T)$ , где  $P$  – осадки,  $T$  – температура воздуха. Для оценки гидрологической репрезентативности ледника, точнее локальных измерений  $Ab/B_s$ , в масштабе речного бассейна предложено оценивать изменение сводного коэффициента корреляции уравнений  $W_{bas} = f(P, T)$  при замене температуры воздуха  $T$  летним балансом массы ледников  $B_s$  или включения  $B_s$  в такие уравнения. В работе показано, что этот метод приемлем для ледников из существующей сети *WGMS* [1, 4].

4. Из-за несовпадения территорий охвата данными сравнение параметров распределения  $F_{gl}$ ,  $N_{gl}$ ,  $\hat{Z}_{max}$ ,  $\hat{Z}_{mean}$ ,  $\hat{Z}_{min}$  в Каталогах *RGI v.6* и *GAMDAM* оказалось возможным только для бассейна р. Катунь. Из табл. 3 следует, что высотно-площадные параметры ледников в бассейне р. Катунь по данным этих Каталогов в большинстве случаев существенно отличаются друг от друга. Возможная причина – использование разных спутниковых изображений и методов их обработки.

5. Выполненный анализ служит основанием для того, чтобы априорную выборку опорных/репрезентативных ледников из существующей сети *WGMS* [1, 4] рассматривать просто как ограниченный набор пунктов локальных

измерений составляющих баланса массы ледников по аналогии с пунктами наблюдений гидрологической или метеорологической сетей. Пространственно-временное распространение (экстраполяция) локальных измерений  $Ab/B_s$  на территории/речные бассейны различного масштаба требует соответствующего количественного обоснования и доказательств.

6. Реализация рассмотренных методов идентификации репрезентативных ледников, мониторинга региональных изменений оледенения и надёжность соответствующих результатов зависят от наличия и качества климатической, гляциологической и гидрологической информации. Для оценки высотно-площадной динамики как отдельных ледников, так и их совокупностей в настоящее время нет других доступных источников данных, кроме каталогов *WGMS* и *RGI*.

**Благодарность.** Финансовая поддержка для проведения настоящего исследования получена из бюджета Института географии РАН в рамках выполнения научных тем № 0148-2018-0008 и № 0148-2019-0004.

**Acknowledgement.** Financial support for this study received from the budget of the Institute of geography, Russian Academy of Sciences in the framework of scientific topics № 0148-2018-0008 and № 0148-2019-0004.

## Литература

## References

1. Global Glacier Change Bulletin. № 1 / Eds.: Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hüsler F., Machguth H., Mölg N., Paul F., and Hoelzle. World Glacier Monitoring Service. Zürich, Switzerland, 2015. 230 p. doi: 10.5904/wgmsfog-2015-11.
2. Dyurgerov M.B., Meier M.F. Glaciers and the changing earth system: A 2004 snapshot. INSTAAR, Occasional Paper № 58. Boulder: University of Colorado, 2005. 117 p. [http://insta-ar.colorado.edu/other/occ\\_papers.html](http://insta-ar.colorado.edu/other/occ_papers.html).
3. Dyurgerov M.B. Reanalysis of glacier changes: from the IGY to the IPY, 1960–2008 // МГИ. 2010. Вып. 108. 116 p.
4. Zemp M., Hoelzle M., Haeberli W. Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network // Annals of Glaciology. 2009. № 50. P. 101–111.
1. *Global Glacier Change Bulletin. № 1.* Eds.: Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hüsler F., Machguth H., Mölg N., Paul F., and Hoelzle. World Glacier Monitoring Service. Zürich, Switzerland, 2015: 230 p. doi: 10.5904/wgmsfog-2015-11.
2. Dyurgerov M.B., Meier M.F. Glaciers and the changing earth system: A 2004 snapshot. INSTAAR, Occasional Paper № 58. Boulder: University of Colorado, 2005: 117 p. [http://insta-ar.colorado.edu/other/occ\\_papers.html](http://insta-ar.colorado.edu/other/occ_papers.html).
3. Dyurgerov M.B. Reanalysis of glacier changes: from the IGY to the IPY, 1960–2008. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2010, 108: 116 p.
4. Zemp M., Hoelzle M., Haeberli W. Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network. *Annals of Glaciology.* 2009, 50: 101–111.
5. *Katalog lednikov SSSR.* USSR Glacier Inventory. V. 8. Is. 8. Pt. 5–7, 11. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1967–1977. [In Russian].

5. Каталог ледников СССР: Т. 8. Ч. 3, 5–7, 11. Л.: Гидрометеиздат, 1967–1977.
6. Каталог ледников СССР: Т. 15. Вып. 1. Ч. 4–7. Л.: Гидрометеиздат, 1978.
7. Каталог ледников СССР. Т. 14. Вып. 3. Ч. 7. Л.: Гидрометеиздат, 1976.
8. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 5.0. July 2015. <http://glims.org/RGI/index.html>.
9. RGI Consortium. 2017. A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. doi: <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
10. Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers // *The Cryosphere*. 2015. № 9. P. 849–864. doi: 10.5194/tc-9-849-2015.
11. Щетинников А.С. Морфология и режим ледников Памиро-Алая. Ташкент: Изд-во САНИГМИ, 1998. 219 с.
12. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков, температуры воздуха и упругости водяного пара в воздухе на метеостанциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. <http://meteo.ru/data>.
13. Williams M.W., Konovalov V.G. Central Asia Temperature and Precipitation Data, 1879–2003. Boulder, Colorado: USA National Snow and Ice Data Center, 2008. [http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174\\_central\\_asia\\_data/index.html](http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174_central_asia_data/index.html).
14. Перцигер Ф.И. Режимно-справочное пособие «Ледник Абрамова – климат, сток, баланс массы. Ташкент: САНИГМИ – Мюнхен: Технический Университет, 1996. 277 с.
15. Коновалов В.Г., Рудаков В.А. Гидрологический режим ледников в бассейнах рек Северного Кавказа и Алтая // *Лёд и Снег*. 2018. № 1. С. 21–40. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-21-40.
16. Fountain A.G., Hoffman M.J., Granshaw F., Riedel J. The ‘benchmark glacier’ concept – does it work? Lessons from the North Cascade Range, USA // *Annals of Glaciology*, 2009. V. 50. P. 163–168.
17. Braithwaite R.J. After six decades of monitoring glacier mass balance we still need data but it should be richer data // *Annals of Glaciology*. 2009. V. 50. P. 191–197.
18. Кренке А.Н. Массобмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 288 с.
19. Боровикова Л.Н., Денисов Ю.М., Трофимова Е.Б., Шенцис И.Д. Математическое моде-
6. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 15. Is. 1. Pt. 4–7. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978. [In Russian].
7. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 14. Is. 3. Pt. 7. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1976. [In Russian].
8. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 5.0. July 2015. <http://glims.org/RGI/index.html>.
9. RGI Consortium. 2017. A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. doi: <https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>.
10. Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers. *The Cryosphere*. 2015, 9: 849–864. doi: 10.5194/tc-9-849-2015.
11. Schetinnikov A.S. *Morfologiya i rezhim lednikov Pamiro-Alaya*. Morphology and regime of Pamir-Alay glaciers. Tashkent: Publ. SANIGMI, 1998: 219 p. [In Russian].
12. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. Description of database on monthly values of precipitation, air temperature and vapor pressure in air at the meteorostations of Russia. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2015620394*. Certificate of state registration of data base № 2015620394. <http://meteo.ru/data>. [In Russian].
13. Williams M.W., Konovalov V.G. Central Asia Temperature and Precipitation Data, 1879–2003. Boulder, Colorado: USA National Snow and Ice Data Center, 2008. [http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174\\_central\\_asia\\_data/index.html](http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174_central_asia_data/index.html).
14. Pertziger F.I. *Rezhimno-spravochnoe posobie «Lednik Abramova – klimat, stok, balans massy»*. «Abramov Glacier Data Reference Book: Climate, Runoff, Mass Balance». Tashkent: SARNIGMI – Munich, Germany: Technical University, 1996: 277 p.
15. Konovalov V.G., Rudakov V.A. *Gidrologicheskiy rezhim lednikov v basseynakh rek Severnogo Kavkaza i Altaya*. Hydrological regime of glaciers in river basins of Northern Caucasus and Altay. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 1: 21–40. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-21-40. [In Russian].
16. Fountain A.G., Hoffman M.J., Granshaw F., Riedel J. The ‘benchmark glacier’ concept – does it work? Lessons from the North Cascade Range, USA. *Annals of Glaciology*, 2009, 50: 163–168.
17. Braithwaite R.J. After six decades of monitoring glacier mass balance we still need data but it should be richer data. *Annals of Glaciology*. 2009, 50: 191–197.
18. Krenke A.N. *Massobmen v lednikovyx sistemakh na territorii SSSR*. Mass exchange in glacial systems on the territory of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 288 p. [In Russian].
19. Borovikova L.N., Denisov Yu.M., Trofimova E.B., Shentsis I.D. Mathematical modelling of runoff formation process for mountain rivers. *Trydy SANIGMI*. Proc. of SANIGMI. 1972, 61 (76): 151 p. [In Russian].



- лирование процесса стока горных рек // Тр. САНИГМИ. 1972. № 61 (76). 151 с.
20. Коновалов В.Г. Пространственная экстраполяция и изменчивость характеристик климата на территории Центральной Азии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2003. № 5. С. 97–106.
21. Bahr D.B., Meier M.F., Peckham S.D. The physical basis of glacier volume-area scaling // Journ. of Geophys. Research. 1997. V. 102. № B9. P. 20355–20362.
22. Коновалов В.Г. Определение средней летней температуры воздуха в высокогорных областях Центральной Азии // Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. М.: Наука, 2006. С. 382–384.
23. Камнянский Г.М. Итоги наблюдений за балансом массы ледника Абрамова (1967–1998 годы) // Тр. САНИГМИ. 2001. № 161 (242). С. 122–131.
24. Коновалов В.Г., Рудаков В.А., Калашникова О.Ю., Гафуров А., Хагг В. Вопросы моделирования и прогноза стока рек снегово-ледникового типа питания в современных условиях // Вопросы географии. Т. 145. Гидрологические изменения. М.: Издат. дом «Кодекс», 2018. С. 123–143.
25. Алексеев Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 363 с.
26. Ледник Абрамова. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 206 с.
27. Ледники Актру. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 117 с.
20. Konovalov V.G. Spatial extrapolation and variability of climate characteristics over the Central Asia territory. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya geograficheskaya*. Proc. of the Academy of Sciences. Geography series. 2003, 5: 97–106. [In Russian].
21. Bahr D.B., Meier M.F., Peckham S.D. The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journ. of Geophys. Research*. 1997, 102 (B9): 20355–20362.
22. Konovalov V.G. Calculation of the averaged summer air temperature in the high mountain areas of Central Asia. *Oledenie Severnoy i Tsentralnoy Evrazii v sovremennuyu epohu*. The glaciation of Northern and Central Eurasia in the modern epoch. Moscow: Nauka, 2006: 382–384. [In Russian].
23. Kamnyanskiy G.M. Results on measurement of mass balance on the Abramova Glacier in 1967–1988. *Trydy SANIGMI*. Proc. of SANIGMI. 2001, 161 (242): 122–131. [In Russian].
24. Konovalov V.G., Rudakov V.A., Kalashnikova O.Yu., Gafurov A., Hagg W. Issues of modeling and forecasting of the rivers flow fed by melted snow and ice under the modern circumstances. *Voprosy geografii. V. 145. Gidrologicheskie izmeneniya*. Problems of Geography. V. 145. Hydrological changes. Moscow: Publishing House «Kodeks», 2018: 123–143. [In Russian].
25. Alekseev G.A. *Ob"ektivnye metody vyravnivaniya i normalizatsii korrelyatsionnykh svyazey*. Objective methods of smoothing and normalization of correlation dependences. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 363 p. [In Russian].
26. *Lednik Abramova*. Abramova Glacier. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 206 p. [In Russian].
27. *Ledniki Aktru*. Aktru Glaciers. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987: 117 p. [In Russian].