

## Многолетние колебания оледенения и стока рек Центральной Азии в современных климатических условиях

В. Г. Коновалов\*, М. В. Вильямс\*\*

*Исследование пространственно-временной вариации статистических параметров многолетних рядов среднего за годовой и вегетационный (апрель — сентябрь) периоды стока рек в бассейнах Амударьи и Сырдарьи проведено по данным измерений на 30 гидрологических постах за 1932—1961 и 1962—1991 гг. Анализ показал, что в 1962—1991 гг. наблюдалось уменьшение объемов годового и сезонного стока в бассейнах Амударьи и Сырдарьи. В сравнении с относительно слабым изменением нормы стока его изменчивость возросла в среднем на 22—24%. Средние, максимальные и минимальные изменения коэффициентов вариации годового и сезонного стока оказались почти одинаковыми. На примере крупных водосборов Центральной Азии оценено влияние на сток сокращения размеров оледенения Памира и Гиссаро-Алая за 30 лет. Выявлена региональная эмпирическая зависимость между средней скоростью уменьшения площади оледенения и средней статистической обеспеченностью климатического индекса баланса аккумуляции и абляции.*

### 1. Введение

В условиях Центральной Азии сток рек в бассейне Аральского моря является функцией процессов аккумуляции сезонных и многолетних твердых и жидких атмосферных осадков, их расходования и трансформации. Одними из основных переменных, используемых в моделях формирования стока горных рек Азии (например, [1, 3, 5, 10, 11, 23]), служат осадки и температура воздуха. Эти же переменные используются как наиболее информативные предикторы в методах прогноза стока рек для разных временных интервалов [2, 10, 12]. Важную роль в режиме стока рек региона играют многолетние водные ресурсы ледников, которые существенно сократились в размерах в течение второй половины XX века [4, 18, 19, 34]. Целью настоящего исследования является ретроспективный сравнительный анализ статистических параметров 30-летних временных рядов стока рек наиболее распространенного снегово-ледникового типа питания, климатических факторов стока за многолетние интервалы времени, а также оценка влияния сокращения площади оледенения на водоносность речных

\* Институт географии Российской академии наук.

\*\* Институт арктических и высокогорных исследований, Колорадский университет, Боулдер, США.

бассейнов. Предполагается, что полученные результаты будут использованы впоследствии в качестве основы для моделирования ожидаемых изменений водных ресурсов в связи с прогнозируемыми глобальными и региональными колебаниями температуры воздуха и осадков.

## 2. Исходные данные

Выбор многолетнего интервала времени и числа гидрологических постов для исследования пространственно-временной вариации среднего за годовой и вегетационный (апрель — сентябрь) периоды стока рек в бассейнах Амударьи и Сырдарьи был обусловлен целью: выполнить статистически обоснованное сравнение водоносности разнообразных бассейнов и факторов формирования стока за отдельные периоды общего интервала времени. В конечном счете для периода с 1932 по 1991 г., разбитого на две 30-летние части (1932—1961 и 1962—1991 гг.), была получена достаточно представительная выборка данных о стоке в бассейнах Амударьи и Сырдарьи, полученная по данным 30 гидрологических постов [14, 21]. Минимальные и максимальные значения гидрографических характеристик водосборов показывают, что в рассматриваемой выборке стока речных бассейнов представлен весьма разнообразный диапазон условий его формирования. Так, географические широты и долготы гидрологических постов находятся в интервалах:  $37,2\text{—}41,8^\circ$  с. ш. и  $66\text{—}74^\circ$  в. д., а их высоты в интервале от 327 до 3576 м над уровнем моря. Расположение большинства гидрологических постов в среднегорной и высокогорной зонах позволяет анализировать режим стока, не искаженный водохозяйственной деятельностью. Площадь речных бассейнов варьирует от 362 до 113000 км<sup>2</sup>, а средняя взвешенная высота водосбора выше замыкающего гидрологического створа — от 1,8 до 4,2 км над уровнем моря. Относительная площадь оледенения в бассейнах колеблется от 0 до 14,6%, что дает возможность проследить влияние деградации ледников в течение 1962—1991 гг. на многолетний режим стока. Для заполнения незначительного числа пропусков в рядах стока за годовой и вегетационный периоды использованы наиболее тесные парные корреляции, полученные за общий период наблюдений во всей выборке данных.

## 3. Изменение стока и характеристик климата в 1932—1991 гг.

Оценки изменения в 1932—1991 гг. сезонного и годового стока 30 отдельных рек в бассейнах Амударьи и Сырдарьи получены путем расчета средних значений и коэффициентов вариации всех 60 рядов стока для двух тридцатилетних интервалов времени (1932—1961 и 1962—1991 гг.). Изменение статистических параметров определено как разность между ними, выраженная в процентах к такому же параметру для более раннего интервала времени. Сводные итоги сравнения статистик многолетних рядов стока, средней годовой и средней летней температуры воздуха на 32 длиннорядных метеорологических станциях в пределах Центральной Азии [9, 24, 27, 28] приведены в табл. 1. Там же содержатся результаты применения критериев Стьюдента (*t*-тест) и Фишера (*F*-тест) для оценки вероятностей

различия средних и дисперсий сравниваемых частей 60-летнего временного ряда. Значения вероятностей в интервале от 80 до 100% выделены в табл. 1 жирным шрифтом. Кроме того, для рядов среднего годового стока и средней годовой температуры воздуха получены параметры уравнений линейного тренда за 1931—1991 гг. В табл. 1 звездочкой отмечены названия пунктов измерений стока и температуры воздуха, где коэффициенты уравнений линейного тренда оказались значимыми с вероятностью от 80 до 100%. Статистические расчеты, аналогичные перечисленным выше, выполнены также для сумм осадков за январь — декабрь и октябрь — апрель по данным 50 метеостанций Центральной Азии в целом за 1952—1991 гг. и две двадцатилетние части этого временного интервала. Использование более короткого интервала вызвано необходимостью устранения влияния замены ветровой защиты осадкомеров и переноса пунктов измерений на однородность временных рядов. Сведения о многолетних колебаниях годовых и сезонных сумм осадков в Центральной Азии и результаты соответствующих статистических тестов представлены в табл. 2.

Анализ изменений средних значений стока за год  $\bar{Q}_y$  и вегетационный период  $\bar{Q}_s$  показывает, что для большинства притоков Амударьи и Сырдарьи в 1962—1991 гг. с вероятностью более 80% наблюдалось уменьшение водоносности бассейнов. Увеличение расходов воды  $\bar{Q}_y$  и  $\bar{Q}_s$  имело место лишь в 4 бассейнах из 30. При этом значимым оно оказалось только в двух случаях. Несмотря на значительные различия площадей водосборов, разброс между минимальными и максимальными изменениями  $\bar{Q}_y$  и  $\bar{Q}_s$  оказался не очень большим. В сравнении с относительно слабым изменением средних многолетних значений  $\bar{Q}_y$  и  $\bar{Q}_s$  весьма существенными оказались различия между коэффициентами вариации ( $C_v$ ) годового и сезонного стока для сравниваемых тридцатилетних интервалов времени. Расчеты показывают, что в 1962—1991 гг. изменчивость стока возросла в среднем на 22—24%. Средние, максимальные и минимальные изменения коэффициентов вариации годового и сезонного стока оказались почти одинаковыми. Уменьшение  $C_v$ , не соответствующее общей картине роста, отмечалось для небольшого числа притоков Амударьи и Сырдарьи. Попытка установления связи между многолетними колебаниями годового и сезонного стока рек Амударьи и Сырдарьи и изменениями температуры воздуха в 1932—1991 гг. привела к следующим результатам.

В зонах формирования стока Амударьи и Сырдарьи в 1962—1991 гг. в сравнении с предыдущим тридцатилетием в большинстве случаев с вероятностью от 80 до 100% отмечается рост средних за год и за летний период температур воздуха. При этом увеличение средних годовых значений  $T_y$  оказалось более существенным, как в абсолютном, так и в относительном выражении. На нескольких метеорологических станциях: Ташкент, Фергана, Нарын, Тянь-Шань — средняя скорость увеличения годовой температуры воздуха составила соответственно 0,027; 0,020; 0,043 и 0,017°C/год, т. е. была в пределах ожидаемой в 2001—2100 гг. средней скорости изменения  $T_y$  в Центральной Азии [30, 40].

## Параметры многолетних колебаний стока и температуры воздуха и

| Река, гидроствор                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $F_{bas}, км^2$ | $\Delta R_s$ | $\Delta R_y$ | $t$ -тест   |             | $F$ -тест       |                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                 | %            |              | $\bar{R}_s$ | $\bar{R}_y$ | $\sigma^2(R_s)$ | $\sigma^2(R_y)$ |
| Бассейны рек Амударья и Зеравшан                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                 |              |              |             |             |                 |                 |
| Пяндж, Нижний Пяндж                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 113000          | -0,9         | 0,2          | 65,0        | 51,8        | 99,9            | 100,0           |
| Вахш, Комсомолабад*                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 29500           | -2,3         | -3,7         | 77,9        | 92,7        | 49,9            | 53,7            |
| Сурхоб, Гарм                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 20000           | 3,6          | -0,9         | 82,7        | 60,0        | 6,3             | 12,1            |
| Гунт, Хорог                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 13700           | -1,2         | -2,3         | 59,2        | 68,9        | 14,7            | 12,8            |
| Бартанг, Мургаб*                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 10500           | -14,8        | -14,8        | 97,5        | 99,8        | 68,8            | 45,6            |
| Зеравшан, Дупули                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 10200           | -1,7         | -0,8         | 66,1        | 58,9        | 43,2            | 52,1            |
| Кафирниган, Чинар                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 3040            | -2,4         | -2,6         | 63,2        | 67,6        | 21,6            | 4,4             |
| Туполанг, Зарчуб                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2200            | 9,1          | 9,4          | 86,8        | 90,7        | 91,4            | 92,3            |
| Язгулем, Мотравн                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1940            | -1,6         | -2,5         | 55,7        | 73,8        | 27,9            | 52,0            |
| Варзоб, Дагана                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 1270            | -3,2         | -1,8         | 84,9        | 66,7        | 21,5            | 12,8            |
| Магиан, Суджина*                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1100            | -24,8        | -22,2        | 99,7        | 99,8        | 96,1            | 97,8            |
| Акдарья, Хазарнова                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 845             | -4,3         | -8,7         | 80,5        | 92,4        | 79,0            | 78,0            |
| Каратаг, Каратаг                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 684             | 1,0          | 2,4          | 66,7        | 68,3        | 60,3            | 25,3            |
| Кашкадарья, Варганза*                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 511             | -14,9        | -15,1        | 94,0        | 94,4        | 85,1            | 80,8            |
| Танхыздарья, Каттаган                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 435             | -11,1        | -11,7        | 86,0        | 82,0        | 96,7            | 98,7            |
| Ханака, Алибеги                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 362             | -3,4         | -1,1         | 85,8        | 57,4        | 53,8            | 20,1            |
| Бассейн реки Сырдарья                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |              |              |             |             |                 |                 |
| Нарын, Учкурган*                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 58400           | -16,2        | -12,9        | 99,5        | 97,2        | 77,7            | 97,1            |
| Нарын, устье р. Кекирим                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 34600           | -2,0         | -4,6         | 70,4        | 86,2        | 9,5             | 4,9             |
| Чирчик, Ходжикент                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 10900           | -4,6         | -2,3         | 80,5        | 64,0        | 57,5            | 72,8            |
| Нарын, Нарын                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 10500           | -0,2         | -3,1         | 53,3        | 79,1        | 41,6            | 33,7            |
| Чаткал, Худайдот                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 6580            | -13,9        | -14,1        | 97,3        | 97,7        | 3,3             | 0,6             |
| Куршаб, Гульча*                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2740            | -3,5         | -3,9         | 85,9        | 97,8        | 79,3            | 100,0           |
| Пскем, Муллола                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2540            | -5,3         | -4,7         | 84,0        | 80,3        | 30,1            | 10,0            |
| Сох, Сарыканда*                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2480            | 8,5          | 6,4          | 98,2        | 96,8        | 83,3            | 80,8            |
| Исфайрам, Учкоргон                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 2200            | -9,1         | -6,6         | 97,8        | 94,0        | 44,6            | 58,7            |
| Исфара, Ташкурган                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1560            | -2,9         | -5,7         | 68,5        | 93,4        | 54,3            | 59,6            |
| Тентяксай, Чарвак                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 1300            | -11,9        | -11,1        | 92,9        | 89,5        | 62,9            | 83,4            |
| Яссы, Саламалик                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1180            | -2,6         | -0,9         | 73,7        | 54,3        | 47,3            | 43,3            |
| Угам, Ходжикент                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 869             | -1,6         | 2,3          | 67,0        | 62,8        | 38,6            | 54,5            |
| Майлису, Кайрагач                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 530             | 11,0         | 5,7          | 79,5        | 75,6        | 36,2            | 63,6            |
| <i>Примечание.</i> $F_{bas}$ — площадь выше гидроствора; $\Delta R_s$ и $\Delta R_y$ — соответственно изменение стока за<br>но изменение средней за год и июнь — август температуры воздуха за те же интервалы времени;<br>рядов стока и температуры воздуха в 1932—1991 гг. являются значимыми с вероятностью 80% и |                 |              |              |             |             |                 |                 |

Коэффициенты вариации средних годовых и сезонных значений температуры воздуха за 1962—1991 гг. стали заметно больше, чем за 1932—1961 гг. При этом увеличение  $C_v$  средней за лето температуры воздуха в областях формирования стока оказалось больше, чем коэффициент вариации  $T_y$ . В равнинной и горной частях территории Центральной Азии наблюдается синхронное изменение климатических значений средних и коэффициентов вариации сравниваемых рядов температуры. Существенное различие, однако, состоит в том, что в высокогорных зонах речных бассейнов изменения климатических факторов стока выражены гораздо значительнее, чем на равнине.

Увеличение в 1972—1991 гг. годовой суммы осадков от 1 до 15% отмечено на 15 метеостанциях из 50, на остальных 35 осадки уменьшились от 1 до 30%. Прирост суммы осадков за октябрь — апрель от 0,1 до 16% наблюдался в 12 пунктах, а уменьшение от 2 до 27% произошло в 38 пунк-

ица 1

## статистические оценки значимости их изменений

| Метеостанция    | Alt, м | $\Delta T_i$ | $\Delta T_y$ | t-тест      |             | F-тест          |                 |
|-----------------|--------|--------------|--------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|
|                 |        | %            |              | $\bar{T}_i$ | $\bar{T}_y$ | $\sigma^2(T_i)$ | $\sigma^2(T_y)$ |
| Чарджоу         | 24     | 1,1          | 1,3          | 97,6        | 92,6        | 15,8            | 15,3            |
| Байрам-али*     | 240    | 0,3          | 1,9          | 70,0        | 95,9        | 22,6            | 5,1             |
| Джизак*         | 344    | -2,2         | 0,0          | 99,9        | 57,2        | 45,4            | 29,1            |
| Коканд*         | 399    | 0,8          | 3,7          | 87,2        | 98,4        | 99,1            | 48,1            |
| Ленинабад*      | 425    | -1,1         | 1,4          | 89,5        | 84,1        | 98,5            | 65,4            |
| Андижан*        | 476    | -0,4         | 1,5          | 66,3        | 85,8        | 2,0             | 0,2             |
| Ташкент*        | 477    | 2,7          | 6,0          | 100,0       | 100,0       | 47,0            | 55,4            |
| Фергана*        | 578    | 1,2          | 4,6          | 93,1        | 99,9        | 8,2             | 10,7            |
| Самарканд*      | 726    | 2,5          | 4,7          | 99,9        | 99,3        | 51,6            | 14,9            |
| Алма-Ата*       | 847    | 0,5          | 4,5          | 57,1        | 95,7        | 26,6            | 72,1            |
| Чарвак          | 974    | 0,4          | 0,9          | 71,6        | 69,0        | 99,9            | 99,8            |
| Ош*             | 1016   | 3,0          | 6,2          | 100,0       | 99,9        | 25,9            | 36,4            |
| Талас*          | 1217   | 1,9          | 8,4          | 94,0        | 99,9        | 67,0            | 2,3             |
| Пскем           | 1256   | 0,5          | 4,4          | 69,5        | 96,8        | 54,0            | 13,9            |
| Гарм*           | 1316   | -0,4         | 3,8          | 54,8        | 96,3        | 71,8            | 2,3             |
| Устье р. Тос*   | 1316   | 0,1          | -0,7         | 58,7        | 70,5        | 28,4            | 13,3            |
| Сангистон*      | 1502   | 0,3          | 1,9          | 62,9        | 63,6        | 77,4            | 28,0            |
| Байтык*         | 1579   | 2,4          | 3,1          | 96,4        | 85,3        | 13,9            | 58,0            |
| Пржевальск*     | 1716   | 3,4          | 14,0         | 99,7        | 100,0       | 56,8            | 14,2            |
| Устье р. Терс   | 1759   | 2,2          | 5,1          | 93,4        | 97,8        | 54,1            | 40,3            |
| Чаткал          | 1937   | 1,9          | 21,7         | 85,3        | 98,5        | 53,6            | 79,8            |
| Нарын*          | 2039   | 3,8          | 52,0         | 98,6        | 100,0       | 60,2            | 43,1            |
| Искандеркуль*   | 2204   | 0,0          | 1,5          | 50,2        | 62,3        | 78,2            | 59,6            |
| Ангрен          | 2286   | 1,3          | 7,7          | 75,9        | 96,8        | 63,2            | 41,6            |
| БАО*            | 2516   | 3,9          | 40,0         | 97,7        | 98,9        | 48,9            | 52,7            |
| Дехавз          | 2561   | 2,2          | 2,4          | 89,7        | 87,1        | 94,4            | 29,2            |
| Алтынташ*       | 2782   | -0,7         | 2,9          | 60,5        | 79,3        | 51,8            | 36,7            |
| Сарыташ*        | 3153   | 3,5          | 12,9         | 91,6        | 90,5        | 80,0            | 100,0           |
| Джавшангоз      | 3436   | 1,8          | 22,5         | 78,4        | 98,8        | 37,7            | 98,6            |
| Тянь-Шань*      | 3614   | 5,9          | 6,3          | 90,3        | 99,9        | 30,5            | 36,8            |
| Каракуль*       | 3930   | 5,1          | 11,2         | 93,8        | 96,6        | 69,9            | 71,7            |
| Ледник Федченко | 4169   | 8,7          | 2,9          | 78,5        | 87,0        | 56,2            | 28,7            |

апрель — сентябрь и год в 1962—1991 гг. относительно 1932—1961 гг.;  $\Delta T_y$  и  $\Delta T_i$  — соответственно  $\Delta T$  — высота над уровнем моря. Звездочкой отмечены пункты, где параметры линейного тренда более. БАО — метеостанция Большое Алма-Атинское озеро.

тах. Примерно такое же соотношение числа метеостанций сохранилось для возросших и уменьшившихся коэффициентов вариации годовой и сезонной сумм осадков, причем изменение абсолютных значений  $C_v$  тех и других сумм осадков оказалось весьма значительным. Таким образом, преобладающее уменьшение в 1962—1991 гг. годового и сезонного объемов стока рек в бассейнах Амударьи и Сырдарьи произошло на фоне повсеместного увеличения годовых и сезонных значений температуры воздуха за это же время и преобладающей тенденции уменьшения годовой и сезонной сумм осадков в 1972—1991 гг. Увеличение изменчивости годового и сезонного стока скорее всего связано со значительным ростом коэффициентов вариации годовых и сезонных значений температуры воздуха. Параметры линейного тренда многолетних рядов стока, температуры воздуха и осадков, как правило, оказались значимыми для пунктов с существенными изменениями стока и его климатических факторов.

Параметры многолетних колебаний годовой и сезонной сумм осадков и

| Метеостанция          | Alt, м | Год              |        |        | Октябрь — апрель |        |        |
|-----------------------|--------|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
|                       |        | $\Delta P_y$ , % | t-тест | F-тест | $\Delta P_s$ , % | t-тест | F-тест |
| Ледник Федченко       | 4169   | 2,9              | 68,5   | 39,6   | -2,5             | 53,4   | 43,0   |
| Тянь-Шань*            | 3614   | -12,3            | 98,5   | 99,3   | -13,8            | 89,6   | 18,9   |
| Мургаб*               | 3576   | -29,5            | 97,5   | 23,4   | -21,4            | 80,7   | 97,9   |
| Анзобский перевал*    | 3373   | 14,1             | 96,8   | 97,3   | 16,4             | 98,5   | 97,9   |
| Сарыташ               | 3153   | -5,0             | 74,4   | 68,3   | -4,1             | 59,2   | 76,9   |
| Шахристанский перевал | 3143   | -7,1             | 94,6   | 19,1   | -7,5             | 84,2   | 64,9   |
| Мынжилки*             | 3017   | -6,6             | 94,8   | 22,0   | -8,4             | 84,2   | 75,9   |
| Каракуджур*           | 2800   | -12,9            | 99,5   | 21,6   | -15,3            | 97,0   | 2,1    |
| Алтынмазар            | 2782   | 7,7              | 79,6   | 74,1   | -2,3             | 57,1   | 88,1   |
| Дехавз                | 2561   | -2,1             | 71,0   | 59,6   | -7,7             | 77,5   | 80,1   |
| БАО*                  | 2516   | -11,2            | 98,1   | 92,5   | -11,8            | 91,7   | 88,0   |
| Дараут-курбан         | 2470   | -1,8             | 61,9   | 39,8   | 0,1              | 68,9   | 54,7   |
| Ангрен                | 2286   | -13,4            | 93,6   | 97,4   | -15,7            | 90,7   | 73,1   |
| Искандеркуль          | 2204   | 4,1              | 59,5   | 56,5   | -4,7             | 63,2   | 59,2   |
| Минчукур              | 2132   | -1,1             | 67,4   | 88,9   | -2,7             | 72,6   | 57,4   |
| Сусамыр               | 2087   | -5,6             | 72,8   | 0,6    | -6,9             | 61,5   | 49,6   |
| Хорог                 | 2075   | -4,7             | 60,4   | 93,9   | -12,6            | 79,4   | 84,2   |
| Нарын                 | 2039   | -6,4             | 80,1   | 4,6    | -8,9             | 74,6   | 64,9   |
| Атбаши                | 2025   | -4,8             | 87,7   | 92,5   | -14,0            | 86,7   | 95,9   |
| Хайдаркан             | 2000   | -5,0             | 79,2   | 73,2   | -7,6             | 80,8   | 25,8   |
| Чаткал*               | 1937   | -23,0            | 99,7   | 84,0   | -26,7            | 99,5   | 68,9   |
| Джергетал             | 1800   | -7,2             | 87,2   | 30,1   | -11,6            | 88,4   | 6,8    |
| Киргизата             | 1766   | 1,4              | 51,9   | 35,9   | 4,3              | 70,0   | 89,0   |
| Устье р. Терс*        | 1759   | -18,0            | 98,7   | 79,6   | -19,3            | 96,9   | 87,6   |
| Байтык                | 1579   | -3,0             | 71,7   | 37,9   | -1,9             | 61,0   | 67,9   |

Примечание.  $\Delta P_y$  и  $\Delta P_s$  — соответственно изменения годовой и сезонной сумм осадков в 1972—

#### 4. Изменение размеров ледников и речной сток

С целью оценки влияния сокращения площади оледенения на изменение стока рек Центральной Азии в 1962—1991 гг. для бассейнов рек Зеравшан и Вахш был выполнен расчет объема ледников, потерянный в результате уменьшения их площади. Методика расчета основана на использовании региональной эмпирической зависимости между объемом  $V$  ( $\text{км}^3$ ) и площадью ледников  $F$  ( $\text{км}^2$ ), полученной М. Майером и Д. Баром [36] для оледенения Центральной Азии:

$$V = 0,041906F^{1,207}. \quad (1)$$

По формуле (1) и данным [18, 19, 32] о площадях оледенения Памиро-Алая, относящимся к 1957, 1966 и 1980 гг., было определено изменение объемов ледников в бассейнах рек Зеравшан и Вахш за соответствующие интервалы времени. Полученные результаты были приведены к данным за 1962—1991 гг. путем линейного преобразования. Далее объемы льда, потерянные вследствие сокращения площади ледников, были пересчитаны в объемы ледникового стока на гидрологических створах на реках Зеравшан и Вахш. При этом использованы: плотность льда  $0,90 \text{ г/см}^3$  и коэффициент стока  $0,75$ , рекомендованный В. Л. Шульцем [16].

ица 2

статистические оценки значимости их изменений

| Метеостанция | Alt, м | Год              |             |             | Октябрь — апрель |             |             |
|--------------|--------|------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|
|              |        | $\Delta P_n$ , % | t-тест      | F-тест      | $\Delta P_n$ , % | t-тест      | F-тест      |
| Гульча       | 1561   | 3,7              | 62,6        | 46,7        | -4,0             | 62,6        | 46,7        |
| Устье р. Тос | 1536   | -3,0             | 77,6        | 60,8        | -5,6             | <b>90,6</b> | <b>84,2</b> |
| Папан        | 1400   | -3,9             | 76,1        | 68,6        | -6,4             | 72,3        | 56,2        |
| Гарм         | 1316   | -2,4             | 68,9        | <b>98,3</b> | -6,4             | 77,9        | <b>84,7</b> |
| Санзар       | 1313   | 3,3              | 55,1        | 48,0        | -3,2             | 66,1        | 8,6         |
| Исфана       | 1300   | 1,9              | 50,9        | 46,1        | 5,5              | 69,3        | 53,2        |
| Пскем        | 1256   | -7,4             | <b>90,2</b> | <b>97,4</b> | -9,7             | <b>87,5</b> | 73,9        |
| Талас        | 1217   | -5,3             | <b>84,3</b> | 75,4        | -5,5             | 70,7        | 44,0        |
| Джаус        | 1200   | 4,1              | 70,8        | <b>96,1</b> | 2,1              | 62,3        | 52,8        |
| Ош*          | 1016   | -15,1            | <b>95,0</b> | <b>81,5</b> | -16,4            | <b>94,1</b> | 72,3        |
| Пенджикент   | 1016   | -7,4             | 70,5        | <b>80,3</b> | 0,1              | 68,4        | <b>84,1</b> |
| Каттаган     | 1000   | -2,8             | 79,3        | <b>94,1</b> | -8,9             | <b>89,1</b> | <b>83,1</b> |
| Чарвак       | 974    | -9,9             | <b>93,8</b> | <b>99,7</b> | -11,7            | <b>90,6</b> | <b>80,4</b> |
| Алма-Ата     | 847    | 0,6              | 62,4        | 17,3        | 0,8              | 50,3        | 1,0         |
| Бишкек       | 823    | 2,3              | 62,8        | 32,6        | 1,6              | 63,2        | 51,4        |
| Янги-акчоб   | 810    | -12,9            | <b>94,1</b> | <b>89,4</b> | -15,1            | <b>94,1</b> | <b>89,4</b> |
| Самарканд    | 726    | -3,4             | 77,0        | <b>81,7</b> | -8,3             | <b>81,5</b> | 73,5        |
| Фергана*     | 578    | 10,8             | 75,1        | 72,6        | 7,6              | 63,9        | 37,7        |
| Ташкент      | 477    | -5,8             | <b>84,4</b> | <b>94,1</b> | -9,1             | <b>90,8</b> | 9,7         |
| Андижан*     | 476    | -19,2            | <b>98,0</b> | <b>85,4</b> | -15,5            | <b>91,1</b> | 54,2        |
| Ленинабад*   | 425    | -12,0            | <b>93,7</b> | 60,0        | -13,8            | <b>92,3</b> | 62,3        |
| Коканд       | 399    | 1,5              | 56,0        | <b>98,0</b> | 1,4              | 59,0        | <b>85,8</b> |
| Джизак       | 344    | -13,1            | <b>97,9</b> | <b>95,1</b> | -16,0            | <b>96,1</b> | 47,7        |
| Байрам-али   | 240    | 7,4              | 72,3        | 14,6        | 7,0              | 60,7        | 67,8        |
| Чарджоу      | 24     | 11,2             | <b>89,5</b> | 9,6         | 6,5              | 78,8        | 52,8        |

1991 гг. относительно 1952—1971 гг. Остальные пояснения, как в табл. 1.

В табл. 3 приведены сводные оценки общего стока рек Зеравшан и Вахш за год и вегетационный период в 1932—1961 и 1962—1991 гг., изменения этих объемов и дополнительного объема стока, поступившего в речную сеть в 1962—1991 гг. вследствие сокращения площади ледников. Из данных табл. 3 следует, что объем талого стока, образовавшийся вследствие сокращения площади оледенения в бассейнах рек Зеравшан и Вахш, не изменил общей тенденции уменьшения водоносности этих бассейнов в 1962—1991 гг. С одной стороны, это объясняется тем, что указанный объем оказался в пределах существующей точности данных о стоке. Анализ качества гидрометрических измерений, выполненный И. Ф. Карасевым и А. Н. Чижевским [7], показал, что суммарная предельная ошибка среднего годового расхода горных рек (по средним месячным данным) составляет 5—16%. Другая причина состоит в том, что на площади бассейна, освободившейся ото льда, происходило накопление снега, таяние которого значительно важнее для стока, чем льда под мореной на концах ледников.

### 5. Скорость сокращения ледников как функция колебаний климата

Поставленная здесь задача существенно отличается от современных исследований в области моделирования или расчета баланса массы ледников и высоты линии равновесия, в качестве примера которых можно назвать работы П. А. Шумского [17], М. Куна [33], Д. Орлеманса [37], Р. Бретвейта

Таблица 3

Составляющие стока рек Зеравшан и Вахш в 1932—1961 гг.  
и 1962—1991 гг.

| Бассейн<br>реки<br>(гидроствор) | Общий сток, км <sup>3</sup> |                   |                      |                   |              |        | Умень-<br>шение<br>объема<br>ледников<br>за 1962—<br>1991 гг.,<br>км <sup>3</sup> льда | Ледниковый сток<br>за 1962—1991 гг.,<br>обусловленный<br>сокращением пло-<br>щади оледенения |                      |                        |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|--------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|
|                                 | год                         |                   | апрель —<br>сентябрь |                   | изменение за |        |                                                                                        | км <sup>3</sup><br>воды на<br>гидро-<br>створе                                               | ‰<br>стока за<br>год | ‰<br>стока за<br>IV—IX |
|                                 | 1932—<br>1961 гг.           | 1962—<br>1991 гг. | 1932—<br>1961 гг.    | 1962—<br>1991 гг. | год          | IV—IX  |                                                                                        |                                                                                              |                      |                        |
| Зеравшан<br>(Дупули)            | 146,26                      | 145,03            | 123,18               | 121,15            | -1,23        | -2,04  | 9,1*                                                                                   | 6,2                                                                                          | 4,2                  | 5,1                    |
| Вахш<br>(Комсомо-<br>лабад)     | 585,06                      | 563,58            | 459,30               | 448,63            | -21,48       | -10,67 | 40,0**                                                                                 | 27,0                                                                                         | 4,8                  | 6,0                    |

Примечание. Одной звездочкой отмечены данные, относящиеся к сокращению площади оледенения за 1962—1991 гг. на 120,5 км<sup>2</sup>, двумя — на 410,9 км<sup>2</sup>.

[22], Л. Рейно [35, 38]. Во-первых, зависимой переменной является ско-  
рость изменения суммарной площади оледенения в пределах одного или  
нескольких речных бассейнов за достаточно продолжительный интервал  
времени (от 14 до 26 лет). Во-вторых, связующим звеном между скоро-  
стью сокращения площади множества ледников и колебаниями климата на  
начальном этапе анализа выбрано среднее за рассматриваемый интервал  
времени значение индекса площади аккумуляции  $K_{ac} = F_{ac}/F_{gl}$  (см. приме-  
чание к табл. 4). Такая постановка задачи, помимо ее очевидной приклад-  
ной значимости, позволила минимизировать трудности учета времени ре-  
лаксации и описания различной реакции ледников на колебания климата.  
Кроме того, среднее многолетнее значение  $K_{ac}$  является синтетической ха-  
рактеристикой условий внешнего питания ледников и переноса их массы.  
Для интервалов времени порядка 20—30 лет и менее будем считать срав-  
нительно постоянным вид функции распределения площади ледника в за-  
висимости от высоты над уровнем моря.

Для определения скорости сокращения площадей ледников и изменения  
других параметров их эволюции на территории Центральной Азии в тече-  
ние 1962—1991 гг. были использованы данные Каталога ледников СССР  
[8] и материалы повторной каталогизации оледенения Памира, Гиссаро-  
Алая и Западного Тянь-Шаня, выполненной А. С. Щетинниковым [18, 19].  
Сводные результаты обработки перечисленных выше сведений представле-  
ны в табл. 4. Значения коэффициентов  $K_{ac}(1)$ ,  $K_{ac}(2)$  и  $K_{gl}$  в табл. 4 рассчи-  
таны как средние взвешенные по площади ледников в каждом конкретном  
речном бассейне или районе. По данным табл. 4 построена зависимость  
средней скорости сокращения площади ледников (см. рисунок) от безраз-  
мерного индекса площади аккумуляции и получено уравнение, соответст-  
вующее этой эмпирической связи:

$$Y = 3395,5 - 24741,5K_{ac}^3 + 38304,1K_{ac}^2 - 19657,7K_{ac}. \quad (2)$$

Таблица 4

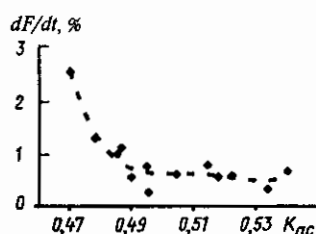
## Характеристики колебаний параметров ледников в Центральной Азии

| Бассейн, район      | Год  | $F_{gl}(1),$<br>км <sup>2</sup> | $K_{ac}(1)$ | $F_{gl}(2),$<br>км <sup>2</sup> | $K_{ac}(2)$ | $K_{ac}(m)$ | $dF,$<br>км <sup>2</sup> | $dF/dt,$<br>%/год | $K_{gl}$ |
|---------------------|------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------------|----------|
| Западный Тянь-Шань  | 1957 | 170,8                           | 0,52        | 146,8                           | 0,49        | 0,50        | 24,0                     | 0,611             | 1,019    |
| р. Ванч             | 1957 | 344,8                           | 0,54        | 291,6                           | 0,54        | 0,54        | 53,3                     | 0,671             | 1,175    |
| р. Гунт             | 1957 | 535,1                           | 0,49        | 441,1                           | 0,50        | 0,50        | 94,0                     | 0,764             | 0,981    |
| р. Зеравшан (Матча) | 1957 | 506,0                           | 0,52        | 437,9                           | 0,52        | 0,52        | 68,1                     | 0,585             | 1,094    |
| р. Кызылсу западная | 1966 | 527,3                           | 0,49        | 486,4                           | 0,49        | 0,49        | 40,9                     | 0,554             | 0,961    |
| р. Муксу            | 1966 | 2064,8                          | 0,49        | 1987,5                          | 0,50        | 0,50        | 77,3                     | 0,267             | 0,983    |
| р. Обихингоу        | 1957 | 810,2                           | 0,52        | 705,1                           | 0,52        | 0,52        | 105,1                    | 0,564             | 1,075    |
| р. Пяндж-1          | 1957 | 383,7                           | 0,48        | 268,9                           | 0,48        | 0,48        | 114,8                    | 1,301             | 0,917    |
| р. Пяндж-2          | 1957 | 52,0                            | 0,54        | 48,1                            | 0,53        | 0,53        | 3,9                      | 0,326             | 1,146    |
| р. Сырдарья-1       | 1964 | 548,1                           | 0,47        | 449,6                           | 0,50        | 0,49        | 98,5                     | 1,123             | 0,949    |
| р. Сырдарья-2       | 1964 | 303,9                           | 0,47        | 180,1                           | 0,47        | 0,47        | 123,9                    | 2,547             | 0,888    |
| р. Шахдара          | 1957 | 216,3                           | 0,49        | 166,7                           | 0,48        | 0,49        | 49,6                     | 0,997             | 0,944    |
| р. Язгулем          | 1954 | 330,4                           | 0,51        | 262,7                           | 0,52        | 0,51        | 67,7                     | 0,788             | 1,060    |

*Примечание.* Пяндж-1 — правые притоки Пянджа выше устья р. Гунт; Пяндж-2 — правые притоки Пянджа ниже устья р. Ванч; Сырдарья-1 — левые притоки от устья Аксу и ниже; Сырдарья-2 — левые притоки Сырдарьи от устья Карадарьи до устья Аксу;  $F_{gl}(1)$  — площадь ледников по данным за год, указанный во втором столбце;  $F_{gl}(2)$  — по данным 1980 г.;  $K_{ac}(1)$  — индекс площади аккумуляции по данным за год, указанный во втором столбце;  $K_{ac}(2)$  — по данным за 1980 г.;  $K_{ac}(m) = (K_{ac}(1) + K_{ac}(2)) \cdot 0,5$ ;  $dF = F_{gl}(1) - F_{gl}(2)$ ;  $K_{gl}$  — ледниковый коэффициент.

Здесь  $Y = dF/dt$  — скорость сокращения площади ледников (проценты относительно ее исходного значения  $F_{gl}$ ),  $K_{ac}$  — индекс площади аккумуляции. Корреляционное отношение для этого уравнения равно 0,95, среднеквадратичная ошибка расчета составляет 0,14%. Интересна сама по себе форма зависимости, представленная на рисунке, которая показывает, что даже при равенстве площадей аккумуляции и абляции происходит устойчивое сокращение размеров ледников Центральной Азии со скоростью 0,5% в год от начального значения площади оледенения. Аналогичный вид будет иметь зависимость, если в качестве аргумента использовать ледниковый коэффициент, поскольку оба этих индекса взаимосвязаны:  $K_{gl} = K_{ac}/(1 - K_{ac})$ . Поскольку климатические характеристики в формуле (2) в явном виде отсутствуют, следует иначе представить ее правую часть.

Средняя величина индекса площади аккумуляции однозначно зависит от нормы максимальных высот снеговой границы для множества ледников, а она, в свою очередь, от годового баланса аккумуляции и абляции или, как показано в работах [11, 31], от индекса баланса этих переменных. Индекс годового баланса аккумуляции и абляции для



Региональная зависимость относительной скорости сокращения площади ледников в бассейнах рек Центральной Азии  $dF/dt$  от индекса площади аккумуляции  $K_{ac}$ .

множества ледников в некотором бассейне представляет собой разность нормированных сезонных аномалий сумм осадков и температуры воздуха на репрезентативной метеорологической станции для данного бассейна. Близкая к функциональной теснота эмпирических зависимостей между максимальной высотой снеговой границы  $Z_{\max}$  и индексом годового баланса аккумуляции и абляции  $I_B$  позволила разработать [10, 11, 31] метод расчета многолетних рядов  $Z_{\max}$  как составную часть модели гидрологического режима ледников в бассейнах рек Центральной Азии. Существование зависимостей  $K_{ac} = f(Z_{\max})$  и  $Z_{\max} = f(I_B)$ , имеющих ясный физический смысл, является вполне приемлемым обоснованием для выявления зависимости средней многолетней скорости сокращения площади оледенения от среднего значения индекса баланса за тот же интервал времени.

Данные о скорости сокращения площадей ледников в бассейнах рек Памира, Западного Тянь-Шаня, Заилийского Алатау и Кунгея Алатау за интервалы времени от 8 до 36 лет были получены после обработки сведений о колебаниях размеров ледников, опубликованных в работах [4, 18, 19]. Диапазон размеров оледенения в отдельных бассейнах и их группах составил от 147 до 1752 км<sup>2</sup>, а относительная величина сокращения площади ледников от 3,7 до 29,2% первоначального значения. В качестве опорного пункта измерений осадков и температуры воздуха для расчета индекса баланса испытаны несколько метеорологических станций: Ледник Федченко (4169 м), Тянь-Шань (3614 м) и Ташкент (477 м). Окончательный выбор в пользу метеостанции Ташкент сделан по следующим соображениям: 1) анализ репрезентативности этого пункта для описания полей осадков и температуры воздуха в Центральной Азии показал [11], что метеостанция Ташкент имеет максимальный рейтинг суммы коэффициентов корреляции рассматриваемых переменных для отдельной метеостанции со всеми остальными в выборке из 26 пунктов; 2) метеостанция Ташкент является одним из самых длиннорядных (с 1875 г.) пунктов непрерывных наблюдений за осадками и температурой воздуха в Центральной Азии, что очень важно для ретроспективных и прогнозных оценок состояния оледенения; 3) средняя скорость увеличения средней годовой температуры воздуха в 1962—1991 гг. на метеостанции Ташкент оказалась близкой к ожидаемой в 1991—2100 гг. средней скорости изменения  $T_y$  в Центральной Азии [30, 40]. В итоге для расчета скорости сокращения площади оледенения (% в год) как функции климатических характеристик была получена эмпирическая формула

$$dF/dt = 1,137 - 0,757P(I_B), \quad (3)$$

где  $P(I_B)$  — средняя за  $t$  лет статистическая обеспеченность разности нормированных аномалий годовых осадков и средней летней температуры воздуха на станции Ташкент. Коэффициент корреляции уравнения (3) равен 0,87. Для проверки (3) на независимом материале использованы результаты определения общей площади группы из 16 ледников в бассейне р. Матча (Зеравшан) для 1957, 1980 гг. [8, 18] и наши оценки для 2001 г. Современные данные о параметрах ледников в бассейне р. Матча получены авторами путем многоэтапной обработки космического цифрового изображения рассматриваемой территории, переданного в августе 2001 г. со спутника "TERRA" в рамках международного научного проекта GLIMS [20]. Мето-

дика обработки включает использование топографических карт масштаба 1 : 100000, цифровой модели рельефа ГТОРО30 [29], подготовленной в Геологической службе США, программных модулей ряда известных ГИС: Envi, Erdas, ArcView, Surfer, Idrisi. С целью развития данного анализа рассмотрено также изменение других характерных морфометрических характеристик ледников — средняя  $Z_{av}$ , минимальная  $Z_{min}$  и максимальная  $Z_{max}$  высоты над уровнем моря.

Концевые области всех ледников в группе покрыты сплошным слоем морены, поэтому для облегчения дешифрирования границ ледников на их космическом изображении использованы материалы перспективной фотосъемки ледников Матчи с борта самолета, выполненной В. Г. Коноваловым в начале сентября 1989 г. Итоговые результаты непосредственной оценки многолетних изменений параметров группы ледников в верховьях р. Матча следующие:

| Год            | 1957   | 1980   | 2001   |
|----------------|--------|--------|--------|
| Параметр       |        |        |        |
| $F_{gl}, км^2$ | 202,71 | 177,46 | 148,77 |
| $Z_{min}$      | 3232   | 3338   | 3654   |
| $Z_{av}$       | 4029   | 3999   | 4109   |
| $Z_{max}$      | 4900   | 4793   | 4512   |
| $V_{gl}, км^3$ | 15,09  | 12,80  | 10,37  |

( $Z_{min}$ ,  $Z_{av}$ ,  $Z_{max}$  — средние взвешенные по площади соответственно минимальная, средняя и максимальная высоты в рассматриваемой группе ледников, метры над уровнем моря,  $V_{gl}$  рассчитан по (1)). Видно, что за 1981—2001 гг. площадь группы ледников уменьшилась на  $28,7 км^2$ . Расчет по формуле (3) средней скорости сокращения площади ледников за это же время и определение разности между значениями площадей в 1980 и 2001 гг. дают  $30,5 км^2$ . Таким образом, относительная разность между измеренной и рассчитанной величинами сокращения площади группы Матчинских ледников составила всего  $1,8 км^2$ , или 6,3%, что является вполне удовлетворительным результатом. Приведенные выше данные иллюстрируют процесс устойчивой деградации оледенения верховьев и всего бассейна р. Зеравшан в течение 1957—2001 гг. За эти 44 года площадь группы Матчинских ледников уменьшилась на  $53,9 км^2$ , а их объем на  $4,72 км^3$ . Сокращение площади ледников сопровождалось повышением их минимальной и средней высот соответственно на 422 и 80 м и понижением максимальной высоты на 388 м. Последнее особенно критично, так как указывает на непрерывное уменьшение площади области питания ледников.

## 6. Обсуждение

1. По данным гидрологических измерений установлено преобладающее уменьшение годового и сезонного стока рек в бассейне Аральского моря в 1962—1991 гг. по сравнению с аналогичными величинами за 1932—1961 гг. Уменьшение водоносности рек произошло на фоне одновременного увеличения в горах и на равнине средней годовой и сезонной температуры воздуха в 1962—1991 гг. и преобладающей многолетней тенденции уменьшения годовой и сезонной сумм осадков. Ряд исключений из этой региональной картины согласуется с выводами О. А. Дроздова [6] о влиянии ко-

лебаний температуры Северного полушария на изменение стока и осадков в бассейне Аральского моря.

Наши сведения о реакции стока основных рек Центральной Азии на изменение климатических характеристик температуры воздуха и осадков вполне согласуются с результатами работы Н. А. Сперанской [15], которая установила, что небольшое повышение средней годовой температуры Северного полушария сопровождалось уменьшением нормы годового стока практически для всех рек европейской территории России. Наибольшее уменьшение стока произошло в бассейне Волги, где оно составило 20—30% нормы.

2. Определено изменение площади и объема ледников в бассейнах Амударьи и Сырдарьи в 1962—1991 гг. по сравнению с предыдущим интервалом времени. Сводные результаты измерений и расчетов представлены в табл. 5. Источником значительной части сведений табл. 5 являются данные Каталога ледников, относящиеся к 1957 г., 1964—1966 гг. и к 1980 г. [8, 18]. Оценки площади ледников в 1962 и 1991 гг. получены авторами методом линейной экстраполяции средней скорости ее изменения, рассчитанной на основе материалов соответствующих каталогов и данных А. С. Щетинникова [18]. Объемы ледников рассчитаны по формуле (1). Для полноты картины деградации ледников Центральной Азии в 1962—1991 гг. добавим, что за сравнимый по продолжительности интервал времени (1955—1990 гг.) площадь и объем ледников Заилийского Алатау уменьшились соответственно на 29,2 и 32,3% [4]. По оценкам МГЭИК [40], за 1959—1992 гг. все ледники Центральной Азии потеряли в результате отступления  $804 \text{ км}^3$  льда. В бассейне р. Пумку (Тибет, Китай), по данным [39], общая площадь оледенения, равная в 1987 г.  $1556 \text{ км}^2$ , уменьшилась к 2001 г. на 14,5%, т. е. скорость сокращения  $F_{gl}$  оказалась почти такой же, как в Заилийском Алатау и бассейне Пянджа.

Сокращение площади оледенения в 1962—1991 гг. произошло на фоне роста в Центральной Азии средней годовой и средней за лето температуры воздуха, преобладающего дефицита осадков и уменьшения объемов годового и сезонного стока в бассейнах Амударьи и Сырдарьи. Как показали расчеты (см. табл. 3), вклад в общий сток объема таяния льда вследствие отступления ледников невелик и находится в пределах точности определения стока за год или вегетационный период. Этот вывод вполне можно

Таблица 5

Характеристики деградации ледников в бассейне Аральского моря в 1962—1991 гг.

| Бассейн                  | $F_{gl}, \text{км}^2$ |         | $-dF_{gl}$    |       | $V_{gl}, \text{км}^3$ |         | $-dV_{gl}$    |       |
|--------------------------|-----------------------|---------|---------------|-------|-----------------------|---------|---------------|-------|
|                          | 1962 г.               | 1991 г. | $\text{км}^2$ | %     | 1962 г.               | 1991 г. | $\text{км}^3$ | %     |
| Сырдарья (левые притоки) | 896,47                | 481,42  | 415,05        | 46,30 | 44,45                 | 21,43   | 23,02         | 51,78 |
| Зеравшан                 | 650,87                | 530,36  | 120,51        | 18,52 | 34,22                 | 25,11   | 9,11          | 26,61 |
| Вахш                     | 3896,77               | 3485,87 | 410,90        | 10,54 | 252,08                | 212,09  | 39,99         | 15,86 |
| Пяндж (правые притоки)   | 3144,11               | 2285,71 | 858,40        | 27,30 | 179,18                | 111,56  | 67,62         | 37,74 |
| Пскем, Чаткал            | 165,58                | 136,37  | 29,22         | 17,65 | 6,70                  | 5,11    | 1,59          | 23,68 |
| Все бассейны             | 8753,80               | 6919,72 | 1834,09       | 20,95 | 516,62                | 375,31  | 141,32        | 27,35 |

распространить на весь Центральноазиатский регион, поскольку он несомненно справедлив для бассейнов рек с относительной площадью оледенения меньшей, чем в бассейнах Зеравшана и Вахша, а относительная площадь ледников в бассейне Вахша весьма близка к ее максимальным значениям в других бассейнах.

3. Одним из наиболее серьезных аспектов обсуждаемой проблемы является оценка качества использованных данных и полученных результатов. Судя по количеству значимых цифр, считается, что в Каталоге ледников СССР точность определения площади составляет  $\pm 0,1 \text{ км}^2$ , а высотных параметров  $\pm 10 \text{ м}$ . Можно утверждать, что такая точность недостижима для отдельного объекта, особенно при наличии боковой и конечной морены, а также учитывая реалии визуального и субъективного дешифрирования контура ледника на его аэрокосмических изображениях и последующее определение площади и высотных параметров с помощью топографической карты масштаба 1 : 100000. Наш опыт определения площади и характерных высот ледников с помощью спутникового снимка верховьев р. Зеравшан в 2001 г. показал, что в общем случае качество конечных результатов зависит и от надежности дешифрирования контуров областей питания ледников, расположенных в сильно расчлененных приводораздельных частях соседних речных бассейнов. Однако чем больше ледников входит в выборку, тем точнее становятся суммарные или осредненные параметры. В нашей работе минимальный размер выборки составляет 16 ледников, во всех остальных случаях площадь и высотные характеристики оледенения в речных бассейнах определены по данным для сотен объектов.

Для облегчения дешифрирования границ ледников, несомненно, полезно использовать перспективные фотографии ледниковых бассейнов и, по возможности, наземный контроль результатов дешифрирования. Одним из этапов обработки изображений высокогорных бассейнов на снимках со спутника "TERRA" является наложение опознанных контуров ледников на цифровую модель рельефа GTOPO30. Согласно документации к GTOPO30 [29], среднеквадратичная ошибка определения высоты для единичного элемента изображения с заданными географическими координатами составляет  $\pm 18 \text{ м}$ , а минимальная разность на один элемент изображения ( $10 \times 10$  пикселей) при определении площади в интервале широты  $30\text{--}40^\circ \text{ с}$ . даст погрешность от 0,66 до  $0,74 \text{ км}^2$ . Таким образом, использование выборок из десятков и сотен отдельных объектов уменьшает систематические и случайные ошибки и делает вполне вероятным определение суммарной площади оледенения с точностью до одного квадратного километра и менее, а характерных высот с погрешностью не более десятка метров.

4. Для обоснования вывода о продолжении сокращения ледников при равенстве площадей абляции и аккумуляции используем сведения о зависимости годового баланса массы абляции и аккумуляции  $B_{gl}$  на ледниках от высоты местности  $z$ , содержащиеся в наиболее полной сводке М. Б. Дюргерова [25, 26] для всего земного шара. В [26] на примере 21 ледника в Северном полушарии показано, что функция  $B_{gl} = f(z)$  в среднем за 1971—1995 гг. имеет линейный или почти линейный характер в интервале высот от конца ледника и примерно до высоты границы питания, затем в интервале от границы питания до начала ледника нелинейно достигает максимума, после чего нелинейно убывает. Из этого следует неравенство вертикальных градиентов баланса массы в областях абляции и аккумуля-

ции, что и приводит к отступанию ледников даже при одинаковых площадях этих областей. В заключение анализа формул (2), (3) следует добавить, что возможности их применения ограничены диапазоном значений в эмпирической выборке и тем, что они получены для условий сокращения площади оледенения Центральной Азии.

Исследования проведены при поддержке грантов РФФИ (02-05-64592), NSF (ATM-0118384) и NATO (CLG-974676).

## Литература

1. Абальян Т. С. Некоторые вопросы расчетов гидрографа горной реки. — Метеорология и гидрология, 1976, № 7, с. 86—93.
2. Боровикова Л. Н., Гриневич А. Г. и др. Статистические методы прогноза стока горных рек. — Труды САНИГМИ, 1977, вып. 51 (132), 84 с.
3. Боровикова Л. Н., Денисов Ю. М., Трофимова Е. Б., Шенцис И. Д. Математическое моделирование процесса стока горных рек. — Труды САНИГМИ, 1972, вып. 61 (76), 150 с.
4. Вилесов Е. Н., Уваров В. Н. Эволюция современного оледенения Зайлийского Алатау в XX веке. — Алматы, Казак Университет, 2001, 252 с.
5. Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. — Л., Гидрометеоздат, 1988, 312 с.
6. Дроздов О. А., Еременко К. В., Малкова И. В., Тезикова О. В. Обзор материалов по характеристике изменений увлажнения Средней Азии с изменением глобальной температуры. — Труды ГГИ, 1990, вып. 348, с. 79—83.
7. Карасев И. Ф., Чижев А. Н. Оточности определения стока по гидрометрическим данным. — Метеорология и гидрология, 1969, № 2, с. 78—84.
8. Каталог ледников СССР. Сырдарья и Амударья. Вып. 1, ч. 1—10, вып. 3, ч. 1—20. — Л., Гидрометеоздат, 1968—1982.
9. Климатологический справочник СССР. Метеорологические данные за отдельные годы. Температура воздуха и осадки на станциях Казахской, Киргизской, Таджикской, Туркменской и Узбекской ССР. Вып. 18, ч. 1—2; вып. 19, ч. 1—2; вып. 30, ч. 1—2; вып. 31, ч. 1—2; вып. 32, ч. 1—2, 1952—1974.
10. Коновалов В. Г. Методы прогноза стока рек Средней Азии с ледниково-снеговым питанием. — Труды САНИИ, 1987, вып. 123 (204), с. 22—32.
11. Коновалов В. Г. Пространственная экстраполяция и изменчивость характеристик климата на территории Центральной Азии. — Известия РАН, сер. географическая, 2003, № 5, с. 97—106.
12. Коновалов В. Г. Расчет и прогноз таяния ледников Средней Азии. — Л., Гидрометеоздат, 1979, 230 с.
13. Коновалов В. Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. — Л., Гидрометеоздат, 1985, 237 с.
14. Основные гидрологические характеристики и Государственный водный кадастр СССР. Том 14, вып. 1. Бассейн р. Сырдарья. — Л., Гидрометеоздат, 1967, 477 с.; 1974, 529 с.; том 14, вып. 3. Бассейн р. Амударья. — Л., Гидрометеоздат, 1976, 434 с.; 1980, 443 с.
15. Сперанская Н. А. Закономерности изменения годового стока рек Советского Союза при изменении глобального термического режима. — Труды ГГИ, 1988, вып. 330, с. 120—125.
16. Шульц В. Л. Реки Средней Азии. — Л., Гидрометеоздат, 1965, 691 с.
17. Шумский П. А. К теории колебаний ледников. — Материалы гляциологических исследований. Хроника. Обсуждения. Вып. 10, М., 1964, с. 104—112.
18. Щетинников А. С. Морфология оледенения речных бассейнов Памиро-Алая по состоянию на 1980 год (справочник). — Ташкент, Изд-во САНИГМИ, 1997, 148 с.
19. Щетинников А. С. Морфология и режим ледников Памиро-Алая. — Ташкент, Изд-во САНИГМИ, 1998, 219 с.

20. Bishop M. P., Kargel J. S., Kieffer H. H., et al. Remote-sensing science and technology for studying glacier processes in high Asia. — *Ann. Glaciol.*, 2000, vol. 31, pp. 164—170.
21. Bodo B. A. Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the Former Soviet Union. — Toronto, Canada, vol. 1.0, 2000.
22. Braithwaite R. J. and Muller F. On the parameterization of glacier equilibrium line altitude. /In: Proc. Riederalp Workshop, September 1978. — IAHS-AISH Publ., 1980, No. 126, pp. 263—271.
23. Braun L. N., Grabs W., and Rana B. Application of a conceptual precipitation-runoff model in the Langtang Khola basin, Nepal Himalaya. Snow and Glacier Hydrology. /In: Proc. Kathmandu Symposium, November 1992. — IAHS Publ. No. 218/1993, pp. 221—237.
24. Daily temperature and precipitation data collected at 223 USSR stations (1881—1989). /Contributed by V. N. Razuvaev, E. B. Apasova, and R. A. Martuganov, All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information—World Data Centre, Obninsk, Russia. Prepared by D. P. Kaiser Carbon Dioxide Information Analysis Center Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. — Environmental Sciences Division Publication No. 4771 (<http://www.meteo.ru/>).
25. Dyurgerov M. B. and Meier M. F. Mass balance of mountain and subpolar glaciers: A new global assessment for 1961—1990. — *Arctic and Alpine Research*, 1997, vol. 29 (4), pp. 379—391.
26. Dyurgerov M. B. Glacier mass balance and regime: Data of measurements and analysis. — University of Colorado, Institute of Arctic and Alpine Research, Occasional Paper 55, 2002, 268 p.
27. Former Soviet Union Monthly Precipitation Archive, 1891—1993. — NSIDC-0059. Boulder, USA (<http://www/nsidc.colorado.edu/>).
28. Global Historical Climatological Network Database. — GHCN, Version 2 (<ftp://www.ncdc.noaa.gov/>).
29. GTOPO30 Documentation, 1997. — U.S. Geological Survey's EROS Data Center in Sioux Falls, South Dakota (<http://edcwww.cr.usgs.gov/>).
30. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, et al. (eds.). — Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 881 p.
31. Konovalov V. G. The hydrological regime of Pamir-Alay glaciers. /In: ICSI (IAHS), UNESCO, Symposium on Glacier Mass Balance. September 14—16, 1994, Innsbruck, Austria. — *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 1997, B. 33, H. 2, pp. 125—131.
32. Konovalov V. G. and Shchetinnikov A. S. Evolution of glaciation in the Pamiro-Alai mountains and its effect on river runoff. — *J. Glaciol.*, 1994, vol. 40, No. 134, pp. 149—157.
33. Kuhn M. The response of the equilibrium line altitude to climatic fluctuations: Theory and observations. /In: *Glacier Fluctuations and Climatic Change*, ed. by J. Oerlemans. — Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1989, pp. 407—417.
34. Kuz'michenok V. A. Fluctuations of glaciers the Akshyirak Ridge from 1943 to 1977. — IAHS Publ. 208, 1991, pp. 507—513.
35. Letreguilly A. and Reinaud L. Space and time distribution of glacier mass-balance in the Northern Hemisphere. — *Arctic and Alpine Research*, 1990, vol. 22, No. 1, pp. 43—50.
36. Meier M. F. and Bahr D. B. Counting glaciers: Use of scaling methods to estimate the number and size distribution of the glaciers of the world. /In: *Glaciers, Ice Sheets and Volcanoes: A Tribute to Mark F. Meier*, S. C. Colbeck (ed.). — US Army CRREL Special Report, 1996, pp. 89—94.
37. Oerlemans J. Modelling glacier fluctuations. Into the second century of worldwide glacier monitoring—prospect and strategies. /A contribution to the International Hydrological Programme (IHP) and the Global Environment Monitoring System (GEMS). Prepared by the World Glacier Monitoring Service. Edited by W. Haeblerli, M. Hoelzle, and S. Suter. — UNESCO, Paris, 1998, pp. 85—96.
38. Reinaud L., Vallon M., and Letreguilly A. Mass-balance measurements: Problems two new methods of determining variations. — *J. Glaciol.*, 1986, vol. 32, No. 112, pp. 446—454.
39. Tao Che, Xin Li, Li Zong Wu, and Rui Jin. Inventory of Glaciers and Glacial Lakes and the Identification of Potential Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) Affected by Global Warming in the Mountains of Himalayan Region. — <http://www.jamstec.go.jp/jamstec-iugg/index.html>.
40. Watson R. T., Zinyowera M. C., and Moss R. T. IPCC Special Report on the Regional Impacts of Climate Change. An Assessment of Vulnerability. 1997. — <http://www.ipcc.ch/>.