

Пространственно-временное изменение составляющих водного баланса на северном склоне Заилийского Алатау

© 2016 г. В.Г. Коновалов¹, Н.В. Пиманкина²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия;

²Институт географии Министерства образования и науки Республики Казахстан, Алматы

¹vladgeo@gmail.com

Spatial-temporal variability of water balance components in the North area of the Zailiisky Alatau Range

V.G. Konovalov¹, N.V. Pimankina²

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

²Institute of Geography, Ministry of Education and Science of Kazakhstan Republic, Almaty

¹vladgeo@gmail.com

Received April 19, 2016

Accepted June 13, 2016

Keywords: *evaporation, glaciation change, glaciers runoff, modeling, precipitation, water balance (WB), Zailiisky Alatau Range.*

Summary

Analysis of changes in WB components (precipitation, evaporation, glacier runoff, dynamical water resources) on the Northern slope of the Zailiisky Alatau was performed for the 1946–2005 time divided into two periods: 1946–1975 and 1976–2005. The territory under investigation included basins of the following rivers: Bolshaya Almatinka, Malaya Almatinka, Talgar, Turgen, Issyk, Chemolgan, Kaskelen, Kargalinka, Prohodnaya, and Uzunkargaly. Their total area down to the closing gauge points amounts to 2644 km². Summarized glacier areas in these basins and annual runoff were equal, respectively, to: 306.6 km² and 39.05 km³ in 1946–1975, and 253.0 km² and 38.35 km³ in 1976–2005. In 1946–2005, typical features of regional glaciation dynamics were increasing area of the moraine cover on glaciers and reducing area of bare ice that results in decreasing of the glacial runoff volume, all other factors being the same. The method to calculate the WB components consists of the following constituents: model of seasonal runoff from melted snow and ice in the areas of accumulation and ablation of glaciers; complex of formulas to calculate precipitation, air temperature and humidity, intensity of ice melting under the moraine, bare ice and evaporation within the height intervals corresponding to the main types of surfaces on the glaciers. On the basis of our method, we could reconstruct for the 1876–2015 period long-term series of data on a runoff, separately annual values and sums for the vegetation periods. They can be used for regional scientific and applied analyses of the river stream discharges. The data on runoff in the Malaya Almatinka River basin and observational data on the meteorological station Almaty (Hydrometeorological Observatory) had been quantitatively substantiated as the representative information for modeling and calculation of water resources on the Northern slope of the Zailiisky Alatau Range.

Поступила 19 апреля 2016 г.

Принята к печати 13 июня 2016 г.

Ключевые слова: *водный баланс, Заилийский Алатау, изменение оледенения, испарение, ледниковый сток, моделирование, осадки.*

Анализ изменения составляющих водного баланса (осадки, испарение, ледниковый сток, динамические запасы воды) на северном склоне Заилийского Алатау выполнен для временного интервала 1946–2005 гг., разделённого на две части: 1946–1975 и 1976–2005 гг. Пространственные границы района исследования включают в себя бассейны следующих рек: Большая Алматинка, Малая Алматинка, Аксай, Талгар, Турген, Иссык, Чемолган, Каскелен, Каргалинка, Проходная, Узункаргалы с общей площадью до замыкающих гидропостов 2644 км². Суммарные значения площади оледенения в этих бассейнах и годовой объём стока по данным гидрологических и гляциологических справочников 1946–1975 гг. были равны соответственно 306,6 км² и 39,05 км³, а в 1976–2005 гг. – 253,0 км² и 38,35 км³. Характерные свойства региональной динамики оледенения в 1946–2005 гг. – увеличение площади моренного покрова на ледниках и сокращение площади открытого льда, что, при прочих равных условиях, приводит к уменьшению объёма ледникового стока. Метод определения составляющих водного баланса включает в себя следующие компоненты: модель сезонного стока от таяния снега и льда в областях аккумуляции и абляции ледников; комплекс расчётных формул для определения осадков, температуры и влажности воздуха, интенсивности таяния льда под мореной, открытого льда и испарения в интервалах высоты для основных типов поверхности на ледниках. Реконструированы многолетние ряды годового и вегетационного стока за 1876–2015 гг., пригодные для региональных научно-прикладных исследований водоносности рек. Количественно обоснована репрезентативность стока в бассейне р. Малая Алматинка и данных наблюдений на метеостанции Алматы для моделирования и расчёта водных ресурсов на северном склоне Заилийского Алатау.

Введение

Пространственные границы района исследования включают в себя бассейны рек: Большая Алматинка, Малая Алматинка, Аксай, Талгар, Тургень, Иссык, Чемолган, Каскелен, Карга-линка, Проходная, Узункаргалы с общей площадью до замыкающих гидропостов 2644 км² [1]. Суммарный объём стока, измеренный на гидропостах, в 1946–1975 гг. составил 39,05 км³, а в 1975–2005 гг. – 38,35 км³. Сведения по стоку получены из гидрологических справочников и ежегодников. Пропуски в рядах по стоку восстановлены с помощью линейных связей с гидропостами-аналогами за совместный период наблюдений. Пространственно-временное изменение годового и вегетационного (апрель–сентябрь) стока рек на северном склоне Заилийского Алатау в 1946–2005 гг. иллюстрируют рис. 1 и табл. 1. В результате анализа этих материалов установлены следующие особенности многолетней динамики водных ресурсов в этом регионе:

1) суммарный годовой сток в 1976–2005 гг. уменьшился всего на 1,8% по сравнению с

1946–1975 гг., а вегетационный практически не изменился;

2) относительная доля вегетационного стока в годовом также оставалась практически одной и той же (71–72%) в эти периоды времени;

3) коэффициенты вариации годового $C_v(1)$ и вегетационного стока $C_v(2)$ в среднем за 1976–2005 гг. (см. табл. 1) увеличились примерно на 8% по сравнению с 1946–1975 гг. В отдельных случаях эта разница составила от 48 до 89%. Изредка наблюдалось уменьшение коэффициента вариации в более поздний период времени.

На фоне отсутствия существенных изменений годового и вегетационного стока в 1946–2005 гг. на северном склоне Заилийского Алатау рост $C_v(1)$ и $C_v(2)$, возможно, связан с изменением гидрологического режима в области оледенения рассматриваемого региона. По многочисленным оценкам динамики ледников Заилийского Алатау, например [2–8], установлено сокращение размеров оледенения. Несомненно, это влияет на вклад талой ледниковой воды в вегетационный сток, в суммарном объёме которого, тем не менее, отсутствуют изменения

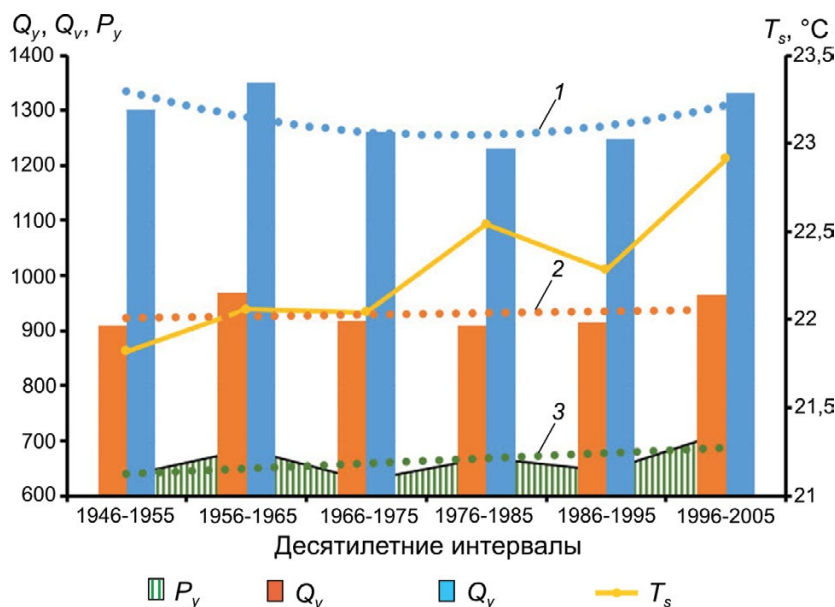


Рис. 1. Изменение в 1946–2005 гг. объёмов годового Q_y и вегетационного стока Q_v на северном склоне Заилийского Алатау, годовой суммы осадков P_y и средней летней температуры воздуха T_s на ГМС Алматы:

1, 2, 3 – соответственно линии тренда переменных Q_y , Q_v , P_y . Размерность левой оси ординат не указана, поскольку она характеризует общий числовой диапазон переменных Q_y , Q_v в млн м³ и P_y в мм/год

Fig. 1. Change in 1946–2005 the following variables: volumes of annual Q_y and vegetation flow Q_v on the northern slope of the Zailiysky Alatau Range, the annual amount of precipitation P_y and average summer air temperature T_s at the MS Almaty: 1, 2, 3 – respectively trendline for variables Q_y , Q_v , P_y . Dimension of the left y-axis is not showed because it characterize common numeric range of variables Q_y , Q_v in million m³ and mm/year for of P_y

Таблица 1. Характеристики гидрологического режима рек на северном склоне Заилийского Алатау

Индекс*	Годы	Речные бассейны										Сумма/ среднее
		Узункаргалы	Чемолган	Талгар	Исык	Тургень	Большая Алматинка	Малая Алматинка	Каскелен	Аксай	Проходная	
\bar{Q}_1	1946–1975	4,0	1,4	10,3	5,0	7,2	3,0	2,2	4,4	2,2	1,6	–
	1976–2005	3,6	1,3	10,2	5,4	7,2	2,8	1,8	4,4	2,6	1,6	
\bar{Q}_2	1946–1975	4,9	1,8	15,2	7,2	11,1	3,7	3,1	6,4	3,3	2,3	–
	1976–2005	4,8	1,7	15,3	7,4	11,1	3,4	2,6	6,7	3,5	2,3	
V_1 , млн ³	1946–1975	126,0	43,4	326,8	159,2	226,7	95,3	70,3	138,1	69,8	49,7	1305,4
	1976–2005	112,2	40,3	322,7	159,4	227,6	88,2	57,0	140,1	83,5	50,9	1281,9
V_2 , млн ³	1946–1975	76,8	27,7	239,5	114,1	176,0	57,7	48,9	100,6	52,5	35,7	929,5
	1976–2005	75,5	26,7	241,4	116,6	176,1	54,3	41,6	105,9	54,6	36,7	929,3
V_2/V_1 %	1946–1975	61,0	63,8	73,3	71,7	77,7	60,5	69,6	72,8	75,2	71,7	71,2
	1976–2005	67,2	66,4	74,8	73,1	77,4	61,6	73,0	75,6	65,4	72,1	72,5
$V_1/\Sigma V_1$ %	1946–1975	9,7	3,3	25	12,2	17,4	7,3	5,4	10,6	5,3	3,8	–
	1976–2005	8,8	3,1	25,2	12,4	17,8	6,9	4,4	10,9	6,5	4,0	
$V_2/\Sigma V_2$ %	1946–1975	8,3	3,0	25,8	12,3	18,9	6,2	5,3	10,8	5,6	3,8	–
	1976–2005	8,1	2,9	26,0	12,5	18,9	5,8	4,5	11,4	5,9	3,9	
$C_v(1)$	1946–1975	0,22	0,22	0,13	0,17	0,14	0,12	0,18	0,15	0,18	0,13	0,16
	1976–2005	0,19	0,16	0,14	0,16	0,15	0,11	0,26	0,25	0,18	0,16	0,18
$C_v(2)$	1946–1975	0,19	0,27	0,14	0,20	0,19	0,18	0,22	0,16	0,24	0,16	0,19
	1976–2005	0,22	0,17	0,14	0,18	0,17	0,25	0,26	0,29	0,21	0,19	0,21

* \bar{Q}_1 – средний годовой расход воды, м³/с; \bar{Q}_2 – средний расход за вегетационный период (апрель–сентябрь), м³/с; V_1 , V_2 , $C_v(1)$, $C_v(2)$ – соответственно объём стока и коэффициент вариации за год и вегетационный период; ΣV_1 и ΣV_2 – объёмы годового и вегетационного стока по всем бассейнам. Сумма выделена курсивом.

в среднем за 1946–1975 и 1976–2005 гг. (см. табл. 1). Анализ и описание средних за 30-летние интервалы времени (с 1946 по 2005 г.) пространственно-временных изменений составляющих водного баланса (осадки, испарение, сток) в гляциальной и внеледниковой областях Заилийского Алатау представляют собой основную цель нашего исследования. Для нескольких речных бассейнов доступны данные по месячному стоку начиная с 1920-х годов до 2008 г. Эти сведения позволяют реконструировать более длительные ряды стока с помощью корреляционных связей с климатическими факторами (осадки, температура воздуха), по крайней мере, за 1876–2015 гг., что актуально для расчёта и прогноза водных ресурсов на северном склоне Заилийского Алатау.

Методика

В бассейнах рек Центральной и Высокогорной Азии, имеющих средне-взвешенную высоту более 1000 м над ур. моря ресурсами формирования стока в течение года служат жидкие осадки, таяние сезонного снега, многолетнего (возрастом более одного года) льда и фирна горных ледников. Такие водотоки относятся к типу рек снегово-ледникового питания, для которых связь между составляющими годового гидрологического цикла (сток, осадки, испарение) выражает уравнение водного баланса речного бассейна:

$$R = K_R(P - E + W_{gl}) + \Delta W, \text{ км}^3, \quad (1)$$

где R – сток; K_R – коэффициент трансформации в сток объёма воды, поступившей на поверхность бассейна; P – осадки; E – испарение с деятельной поверхности водосбора; W_{gl} – таяние многолетних запасов льда и фирна; ΔW – динамические запасы воды в бассейне.

Применение коэффициента K_R обусловлено тем, что сумма $P - E + W_{gl}$ представляет собой «климатический

сток», отличающийся от измеренного на гидропосте на величину выклинивания подземных вод и баланса антропогенного водозабора и сброса стока. В уравнении (1) многолетний ряд объёмов стока R – характеристика, непосредственно измеряемая на гидрологических створах, замыкающих площадь бассейна F_{bas} , на которой формируется сток. Площадь F_{bas} используется также при определении объёмов осадков и испарения. Часть площади оледенения в бассейне, на которой происходит таяние многолетнего льда и фирна, меняется каждый год в зависимости от абсолютной высоты нулевого баланса процессов аккумуляции и абляции. Для расчётов среднего многолетнего объёма стока за 1946–1975 и 1976–2005 гг. по уравнению (1) принято, что W_{gl} образуется в течение июня–августа на площади абляции, т.е. от конца ледника до средней высоты границы фирнового питания. Все виды осадков, выпадающие на поверхность ледников в речном бассейне, составляют часть общей суммы P . Проблема определения и пространственно-временного анализа составляющих уравнения (1) включает в себя информационный, методический и прикладной аспекты, которые будут рассмотрены далее.

Для определения составляющих P , E , W_{gl} и ΔW будем применять различные методы расчёта. Так, на основании слабой многолетней изменчивости межлетнего стока его объём в течение января–марта приравнен к величине ΔW в уравнении (1). Входной информацией для расчёта W_{gl} служат в основном данные стандартных измерений температуры воздуха, упругости водяного пара в воздухе и осадков на сети метеорологических станций (МС), содержащиеся в климатических базах [9–11], данные справочников и ежемесячников Казгидромета, материалы по морфометрии ледников в Каталогах [1, 8, 12] и базе данных GLIMS (<http://glims.colorado.edu/glacierdata/>). Все дополнительные параметры, необходимые для расчётов P , E , W_{gl} , определяются заранее и составляют часть входной информации.

Модель ледникового стока W_{gl} . Методической основой для определения W_{gl} служит упрощённый для средних многолетних условий вариант физико-статистической модели РЕГМОД процессов аккумуляции и абляции снега и льда в гляциальных областях Центральной Азии, подробно изложенной в работах [13–16]. Упрощение состо-

ит в использовании для расчёта W_{gl} осреднённых за общий интервал времени многолетних значений климатических факторов речного стока и высотно-площадных характеристик ледников. Учитывая линейный характер связи между слоем таяния и высотой над уровнем моря [13, 14], запишем в общем виде уравнения для определения годовых/сезонных объёмов ледникового стока, который образуется в областях абляции $V(ab)$ и аккумуляции $V(ac)$ в интервалах высоты $Z_e - Z_{uml}$, $Z_{uml} - Z_{fg}$ и $Z_{fg} - Z_b$. Здесь Z_e и Z_b – соответственно высоты конца и начала ледника; Z_{uml} – верхний уровень распространения сплошного моренного покрова; Z_{fg} – высота фирновой границы:

$$V(ab) = [M_2(\tilde{Z}_{mor})F_{mor} + M_1(\tilde{Z}_{ice})F_{ice}]K_R(ab); \quad (2)$$

$$V(ac) = M(\tilde{Z}_{ac})F_{ac}K_R(ac). \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) $M_2(\tilde{Z}_{mor})$, $M_1(\tilde{Z}_{ice})$ и $M(\tilde{Z}_{ac})$ – соответственно слои таяния на средних взвешенных высотах для площади сплошной морены F_{mor} , открытого льда F_{ice} и области аккумуляции F_{ac} ; $K_R(ab)$ и $K_R(ac)$ – коэффициенты стока из областей абляции и аккумуляции; $F_{ab} = F_{mor} + F_{ice}$ и F_{ac} – соответственно площади областей абляции и аккумуляции. Для оценки пространственно-временного изменения W_{gl} в районе исследования необходимо учитывать изменение размеров F_{mor} , F_{ice} , а для расчёта $M_2(\tilde{Z}_{mor})$ и $M_1(\tilde{Z}_{ice})$ следует применять формулы, где аргументы и эмпирические коэффициенты получены как функции абсолютной высоты Z , широты φ и долготы λ . В частности, для расчёта M_1 , M_2 в бассейнах рек Заилийского Алатау с помощью данных о средней температуре воздуха использованы следующие выражения:

$$M_1(\tilde{Z}_{ice}) = [a\bar{T}_s(\tilde{Z}_{ice}, \varphi, \lambda) + c(\tilde{Z}_{ice}, \varphi, \lambda)]N_{ice}(\tilde{Z}_{ice}, \varphi, \lambda); \quad (4)$$

$$M_1(\tilde{Z}_{mor}) = [a\bar{T}_s(\tilde{Z}_{mor}, \varphi, \lambda) + c(\tilde{Z}_{mor}, \varphi, \lambda)]N_{ice}(\tilde{Z}_{mor}, \varphi, \lambda); \quad (5)$$

$$c[Z, \varphi, \lambda] = (0,26Z - 0,33\varphi + 0,09\lambda + 6,72)10, \text{ мм.}$$

В формулах (4) и (5): $a \sim \text{const} = 0,57$; $N_{ice}(\tilde{Z}_{ice}, \varphi, \lambda)$ – число дней таяния открытого льда, равное 92 (продолжительность периода июнь–август) минус N_{sm} – число дней выпадения и таяния снега на высоте \tilde{Z} . N_{sm} определяется на основе региональных зависимостей осадков от высоты местности и географических координат (приведены далее) и формулы (4).

$f(h_c)$ – безразмерная функция ослабления таяния под покровом морены, имеющая в интервале $0 < h_c < 2$ см максимум и две характерные точки, в которых $f(h_c) = 1$. Практические расчёты $f(h_c)$ упрощаются путём применения ранее полученных [15, 16] выражений для морены толщиной от 0 до 2 см –

$$f(h_c)_1 = 0,15h_c^3 - 0,56h_c^2 + 0,43h_c + 1,00 \quad (6)$$

и толщиной более 2 см –

$$f(h_c)_2 = 1,5h_c^{-0,62} \quad (7)$$

Вычисление среднего слоя морены \bar{h}_c на высоте \bar{Z}_{mor} выполняется по формуле

$$\bar{h} = H_c(Z_e)0,5,$$

где $H_c(Z_e)$ – толщина морены на конце ледника; определение $H_c(Z_e)$ основано на региональной зависимости $H_c(Z_e) = f(\Omega)$, где Ω – отношение площадей сплошного моренного покрова и области абляции.

В качестве численной аппроксимации зависимости $H_c(Z_e) = f(\Omega)$ получена [15, 16] эмпирическая формула

$$H_c(Z_e) = 88\Omega, \text{ см.} \quad (8)$$

Коэффициент корреляции для зависимости (8) равен 0,97. Информация для определения Ω содержится в Каталогах [1, 8, 12].

Расчёт осадков и испарения. Общий вид формулы для расчёта объёмов осадков P , испарения E и других переменных как одномерных функций высоты местности z в интервале $Z_{min} - Z_{max}$ следующий:

$$X_z = \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} x(z)s(z)dz,$$

где $s(z)$ – распределение площади по высоте в интервале $Z_{min} - Z_{max}$.

Применив к интегралу от произведения двух функций $x(z)$ и $s(z)$ обобщённую теорему о среднем в интегральном исчислении, получим:

$$X_z = x(\bar{z}) \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} s(z)dz,$$

где $F = \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} s(z)dz$ – площадь в интервале $Z_{min} - Z_{max}$.

В итоге

$$X_z = x(\bar{z})F \text{ или} \quad (9)$$

для среднего значения $\bar{x} = x(\bar{z})$, где \bar{z} – средняя взвешенная высота над ур. моря в интервале $Z_{min} - Z_{max}$.

В формуле (9) множитель $x(z)$ может быть представлен как линейная или квадратичная функция одного аргумента (z) или нескольких (высота z , географические координаты: широта φ , долгота λ). Если функции $x(z)$ или $x(z, \varphi, \lambda)$ используются для пространственной экстраполяции зависимой переменной, то в неё добавляются известные значения функции в опорных пунктах $x(z_0)$ или $x(z_0, \varphi_0, \lambda_0)$. Для расчёта климатических составляющих уравнения (1) использована формула (9), в которой общий вид сомножителя $x(z)$ принят в виде функции высоты над ур. моря и географических координат. Соответствующие выражения с конкретными значениями эмпирических коэффициентов неоднократно (см., например, [13, 14, 16]) использовались для расчётов многолетних рядов стока рек снегово-ледникового питания в бассейнах притоков Амударьи и Сырдарьи.

Для северного склона Заилийского Алатау, по наблюдениям Казгидромета на сети ГМС, постов и суммарных осадкомеров, установлены региональные зависимости осадков за год P_y и летний периоды P_s как функции высоты местности над ур. моря, которые приведены на рис. 2, и получены следующие рабочие формулы:

$$P_y = -109,5z^2 + 722,3z - 50,6, \text{ мм;} \quad (10)$$

$$P_s = 127,0z + 8,4z, \text{ мм.} \quad (11)$$

Коэффициент детерминации для зависимостей (10) и (11) соответственно равен 0,94 и 0,94, а среднеквадратичная ошибка расчёта по выражениям (10) и (11) составляет 80 и 44 мм. Объём испарения и составляющие ледникового стока определяли с учётом временного изменения в 1946–1975 и 1976–2005 гг. средних значений температуры воздуха T и упругости водяного пара в воздухе e на высоте z за год (y) и лето (s) по следующим формулам:

$$T_y(z) = T_y(z_0) - \gamma_T(z - z_0); \quad (12)$$

$$T_s(z) = T_s(z_0) - \gamma_T(z - z_0); \quad (13)$$

$$e_y(z) = e_y(z_0) - \gamma_e(z - z_0); \quad (14)$$

$$e_s(z) = e_s(z_0) - \gamma_e(z - z_0). \quad (15)$$

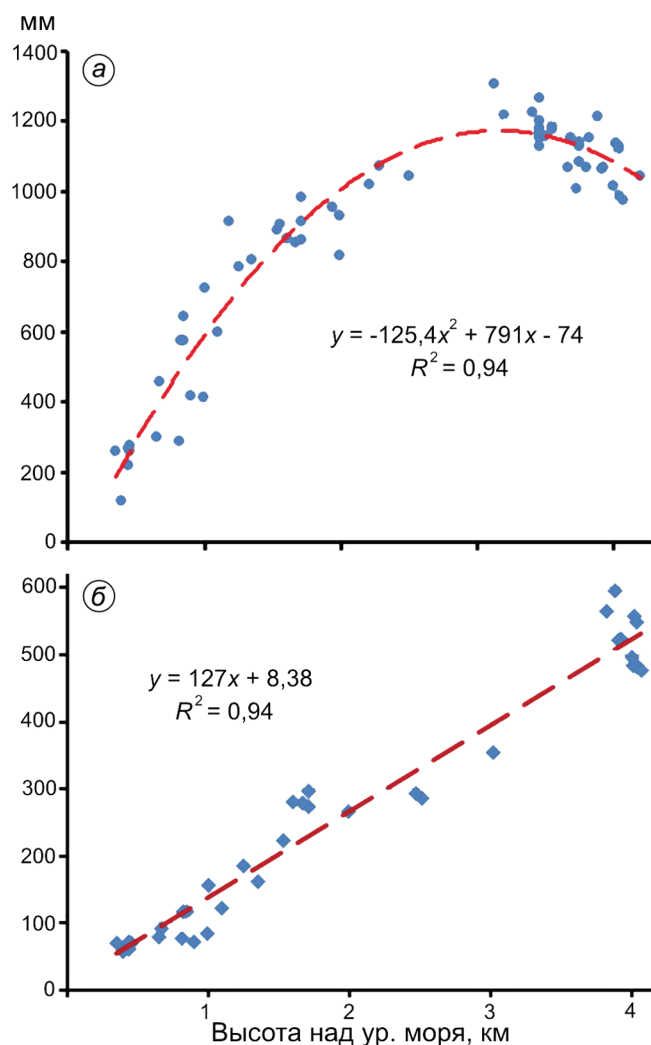


Рис. 2. Сумма осадков за год (а) и за лето (июнь–август) (б) как функция высоты над ур. моря, км

Fig. 2. The amount of precipitation for the year (a), and during the summer (June–August) (b) as a function of altitude above sea level, km

Здесь размерности T – °C, e – мбар; γ_T и γ_e – соответственно вертикальные градиенты температуры воздуха, °C/км, и упругости водяного пара в воздухе, мбар/км; z_0 – высота опорной МС и z , км над ур. моря.

Для расчёта средней многолетней годовой суммы осадков P_y на северном склоне Заилийского Алатау, средней летней температуры воздуха T_s и упругости водяного пара в воздухе e_s как функции высоты над уровнем моря Alt и географических координат (широта Lat , долгота $Long$) получены эмпирические формулы (16)–(18). Обычно параметры таких формул зависят от состава использованных выборок:

$$P_y = -1734,8 - 104,5Alt^2 + 660,2Alt + 103,9Long - 143,9Lat; \quad (16)$$

$$T_s = 24,45 + 0,007Long + 0,04Lat - 6,39Alt; \quad (17)$$

$$e_s = 58,2 - 2,45Alt - 0,03Long - 0,97Lat. \quad (18)$$

Сводный коэффициент корреляции для выражений (16)–(18) соответственно равен: 0,98, 0,98, 0,99, а среднеквадратичная ошибка расчёта по этим формулам составляет 94 мм; 0,95 °C; 0,44 мбар. Пространственное распределение P_y , T_s , e_s на северном склоне Заилийского Алатау иллюстрирует рис. 3. Эти схемы отражают фоновую картину сравнительно плавного изменения P_y , T_s , e_s по мере роста абсолютной высоты. Построены они на основе данных нерегулярной сети пунктов, плотность которой имеет случайный характер и не охватывает равномерно исследуемый регион (рис. 4). Если последовательно совмещать систему изолиний P_y , T_s , e_s на рис. 3 с гипсометрией территории в разном масштабе, то соответствие полученных полей P_y , T_s , e_s реальному их распределению наиболее вероятно для карт среднего и мелкого масштабов. Если для описания изменений P_y , T_s , e_s используются однофакторные линейные зависимости, не учитывающие влияние уклона и экспозиции рельефа, то, несомненно, региональное поле осадков имеет более сложный многофакторный характер. Приемлемость основных свойств полученных распределений может быть установлена апостериори после использования формул (12)–(18) для моделирования и расчёта годового и вегетационного стока в бассейнах рек на северном склоне Заилийского Алатау. Однако даже сейчас система изолиний осадков на рис. 3 более адекватно отражает их распределение, особенно в гляциальной области региона, по сравнению, например, с картой твёрдых осадков на Тянь-Шане в электронном Атласе [17].

Общий вид формул для определения объёма испарения E_v (км³/лето) на площади области абляции таков:

$$E_v = E(\tilde{Z})F_{ab};$$

$$E(\tilde{Z}) = PE \operatorname{th}[P_s(\tilde{Z})/PE(\tilde{Z})]; \quad (19)$$

$$P_s(\tilde{Z}) - M(\tilde{Z}) = 0; \quad (20)$$

$$PE = 0,0018[25 + T_s(\tilde{Z})^2(100 - r(\tilde{Z}))]; \quad (21)$$

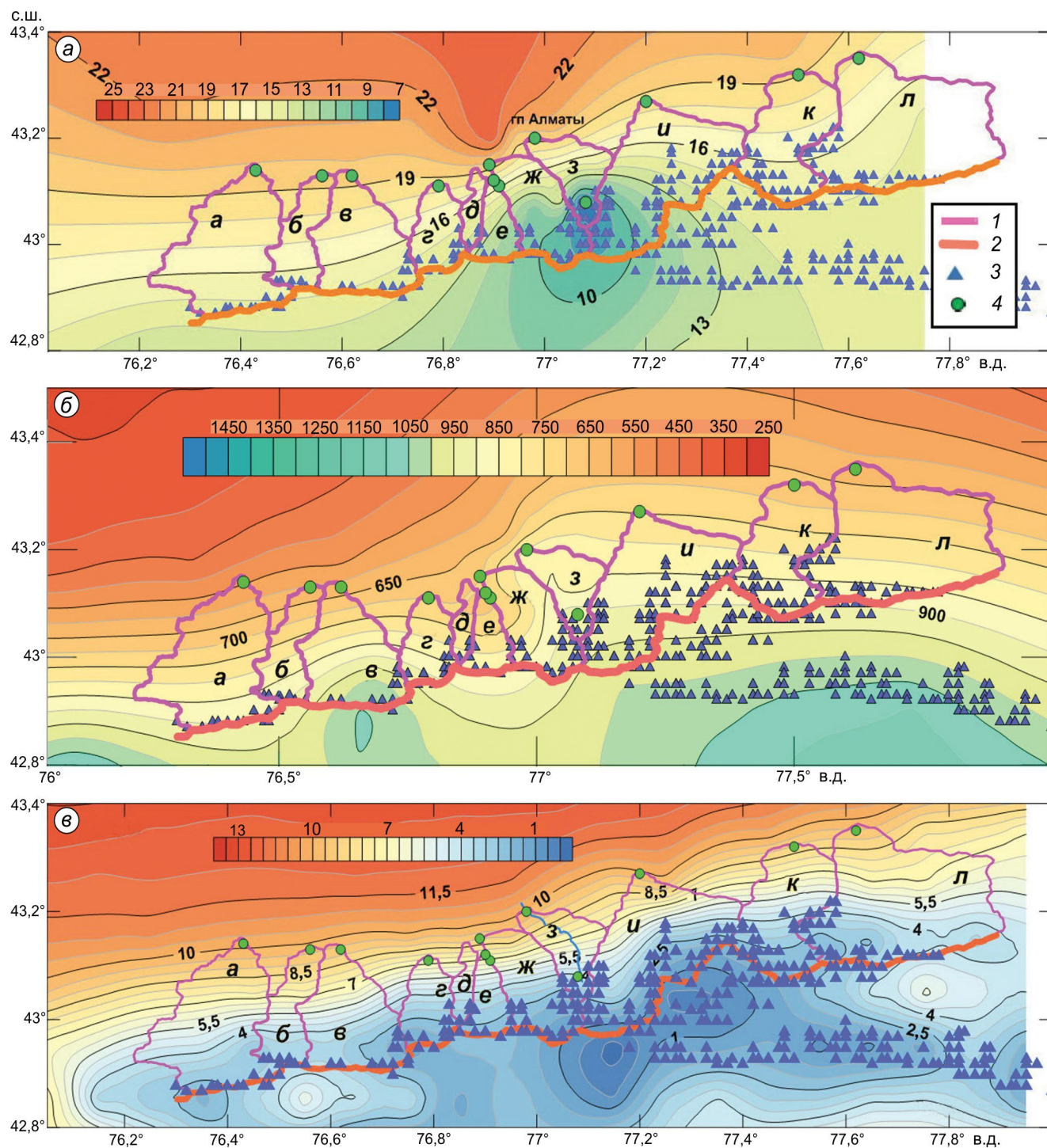


Рис. 3. Распределение климатических факторов стока на северном склоне Зайлийского Алатау:

a – средняя летняя температуры воздуха, °C; *б* – годовые осадки, мм; *в* – упругость водяного пара в воздухе, мбар; 1 – граница бассейна; 2 – водораздел Зайлийского Алатау; 3 – отдельные ледники; 4 – гидропосты; названия речных бассейнов на схемах: *a* – Узункаргалы, *б* – Чемолган, *в* – Каскелен, *г* – Аксай, *д* – Каргалинка, *е* – Проходная, *ж* – Бол. Алматинка, *з* – Мал. Алматинка, *и* – Талгар, *к* – Иссык, *л* – Турген

Fig. 3. The distribution of climatic factors on the northern slope Zailiysky Alatau Range:

a – the average summer air temperature, °C; *б* – annual precipitation, mm; *в* – water vapor pressure in the air, mbar; 1 – border of the basin; 2 – watershed of Zailiysky Alatau Range; 3 – individual glaciers; 4 – gauging stations; names of river basins in the diagrams: *a* – Uzunkargaly, *б* – Chemolgan, *в* – Kaskelen, *г* – Aksay, *д* – Kargalinka, *е* – Prohodnaya, *ж* – B.Almatinka, *з* – M.Almatinka, *и* – Talgar, *к* – Issyk, *л* – Turgen

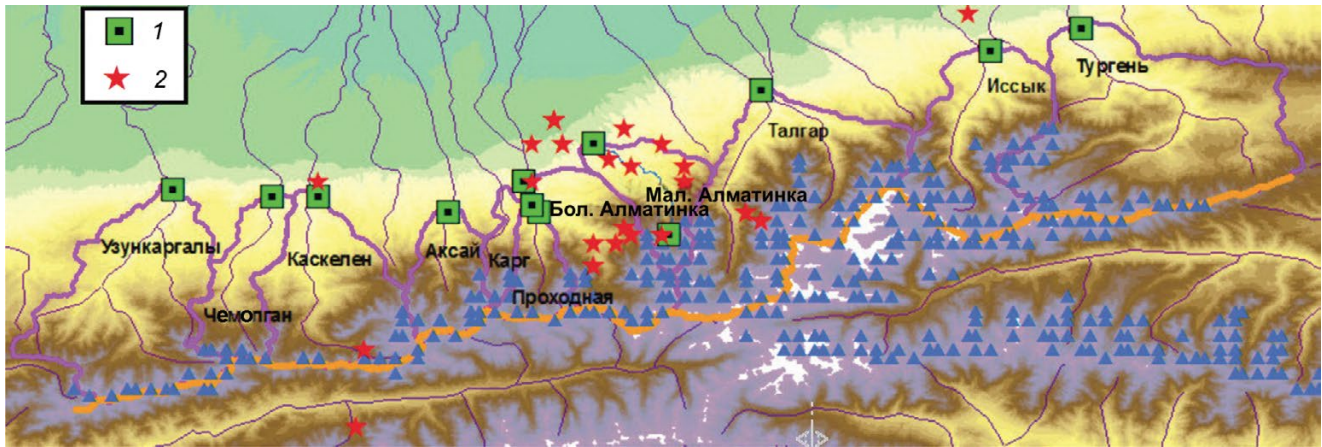


Рис. 4. Пункты измерения стока (1), осадков, температуры воздуха, упругости водяного пара (2) в бассейнах рек на северном склоне Заилийского Алатау (Кург – Кургалинка).

См. также условные обозначения на рис. 3, а

Fig. 4. Points flow measurement (1), and precipitation, air temperature, water vapor pressure (2) in the basins of the northern slope of the Zailiysky Alatau Range (Kurg – Kurgalinka river basin)

See also legend for the fig. 3, a

$$e_n(\bar{Z}) = 6,1 \cdot 10^{\left[\frac{7,45 T_s(\bar{Z})}{235 + T_s(\bar{Z})} \right]}, \quad (22)$$

$$e_p(\bar{Z}) = 0,15 \bar{Z}^2 - 3,21 \bar{Z} + 14,34; \quad (23)$$

$$r(\bar{Z}) = e_p(\bar{Z})/e_n(\bar{Z}). \quad (24)$$

Здесь E – суммарный за лето (июнь–август) слой испарения, мм; \bar{Z} – средняя взвешенная высота в интервале $Z_e - Z_{fg}$; F_{ab} – площадь области абляции; T_s – средняя за лето температура воздуха; PE – наибольшая возможная величина испарения при данных условиях увлажнения; P_s – сезонная сумма осадков; формула (19) – известное уравнение Ольдекопа для расчёта испарения; th – гиперболический тангенс; формула (20) – уравнение баланса аккумуляции и абляции на высоте \bar{Z} ; формула (21) – формула Романенко [18] для расчёта наибольшей возможной величины испарения PE при данных условиях увлажнения (мм/месяц); выражение (22) – формула Магнуса для расчёта насыщенного парциального давления водяного пара e_n при данной температуре воздуха; формула (23) – региональная зависимость парциального давления водяного пара e_p от высоты; формула (24) – выражение для определения относительной влажности воздуха. Для вывода формулы (23) использованы наблюдения метеостанций и данные аэрозондирования атмосферы, всего 320 пунктов на территории Цен-

тральной и Высокой Азии, расположенных в интервалах 58,33–118,62° в.д., 30,18–51,12° с.ш. и на высоте 360–5583 м над ур. моря.

Таким образом, рассматриваемый метод содержит следующие компоненты: 1) уравнения (7) и (8) для моделирования сезонного стока от таяния снега и льда в областях аккумуляции и абляции ледников; 2) комплекс расчётных формул для определения осадков, температуры и влажности воздуха, интенсивности таяния льда под мореной, открытого льда и испарения в интервалах высоты $Z_e - Z_{uml}$, $Z_{uml} - Z_{fg}$ и $Z_{fg} - Z_b$ на ледниках.

Исходные данные

Исследование и расчёт составляющих водного баланса на северном склоне Заилийского Алатау выполнены на основе гляциологических, гидрологических и климатических исходных данных. На рис. 4 приведена схема расположения пунктов измерения гидрологических и климатических характеристик, использованных для расчёта составляющих водного баланса в 1946–2005 гг. Гидрографические данные для речных бассейнов содержатся в табл. 2. Информационной основой для гидрологического анализа служили многолетние ряды средних месячных величин стока на десяти гидропостах, опубликованные в ежегодниках и базе данных [19], а

Таблица 2. Параметры речных бассейнов и оледенения*

Речной бассейн (гидропост)	F_{bas} , км ²	λ , в.д.	Φ , с.ш.	\bar{Z} , м / Z_{gs} , м	Годы	Параметры оледенения, км ²				N_{gl}	Скорость изменения, км ² /год			
						F_{gl}	F_{ab}	F_{mor}	F_{ice}		ΔF_{gl}	ΔF_{ab}	ΔF_{mor}	ΔF_{ice}
Большая Алматинка (выше устья р. Проходная)	155	76,89	43,15	2723	1946–1975	31,50	15,66	6,30	9,36	29	–			
				1471	1976–2005	20,93	10,41	5,02	5,40	28				
				2560	1946–1975	11,4	5,66	2,3	3,36	12				
Малая Алматинка (г. Алматы)	118	76,98	43,20	1175	1976–2005	8,19	4,07	1,90	2,17	10	0,11 0,05 0,01 0,04			
				2840	1946–1975	116,80	58,23	8,30	49,93	71				
Талгар (г. Талгар)	444	77,23	43,27	1199	1976–2005	96,13	47,91	17,29	30,77	68	0,69 0,34 –0,30 0,64			
				2769	1946–1975	39,40	19,60	4,50	15,10	30				
Тургень (с. Таутургень)	621	77,60	43,35	1142	1976–2005	32,78	16,31	7,80	8,53	29	0,22 0,11 –0,11 0,22			
				2150	1946–1975	2,10	1,03	0,50	0,54	9				
Чемолган (с. Чемолган)	139	76,56	43,13	1097	1976–2005	2,08	1,03	0,85	0,28	5	0,00 0,00 –0,01 0,01			
				2514	1946–1975	52,70	26,26	3,90	22,36	37				
Иссык (г. Иссык)	256	77,48	43,22	1286	1976–2005	43,18	21,53	12,82	8,71	25	0,32 0,16 –0,30 0,45			
				2120	1946–1975	12,30	6,12	2,60	3,52	14				
Каскелен (с. Каскелен)	305	76,64	43,13	1129	1976–2005	12,74	6,35	3,58	2,78	12	0,05 0,02 0,00 0,07			
				2757	1946–1975	12,30	6,11	1,60	4,51	14				
Узункаргалы (пос. Фабричный)	344	76,43	43,14	1120	1976–2005	14,38	7,14	5,12	2,07	17	–0,07 –0,03 –0,12 0,08			
				2947	1946–1975	7,70	3,82	1,70	2,12	12				
Проходная (устье)	82	76,89	43,12	1475	1976–2005	5,91	2,93	2,19	0,81	13	0,06 0,03 –0,02 0,04			
				2598	1946–1975	15,50	7,70	2,80	4,91	16				
Акса́й (кордон Аксайский)	135	76,79	43,11	1437	1976–2005	13,64	6,78	3,89	2,90	13	0,06 0,03 –0,04 0,07			
				2924	1946–1975	4,90	2,43	1,00	1,43	7				
Каралинка	44	76,86	43,15		1976–2005	3,02	1,50	0,88	0,62	3	0,06 0,03 0,00 0,03			
					1946–1975	306,6	152,62	35,5	117,14	258				
Зайли́йский А́латау	2644			–	1976–2005	252,98	125,96	61,34	65,04	223	1,85 0,92 –0,83 1,79			
					min	2,10	1,03	0,50	0,54					
					max	116,8	58,23	8,30	49,93					
					min	2,08	1,03	0,85	0,28					
				1976–2005 гг.	max	96,13	47,91	17,29	30,77		–			
					min									
					max									
					min									

* F_{bas} – площадь бассейна выше замыкающего гидропоста; λ и Φ – соответственно долгота и широта в целых и десятичных долях градуса для центра тяжести бассейна со средней взвешенной высотой \bar{Z} ; Z_{gs} – высота гидропоста, м над ур. моря; F_{gl} – общая площадь ледников; F_{ab} – площадь области абляции; F_{mor} – площадь моренного покрова; F_{ice} – площадь открытого льда в области абляции; N_{gl} – число ледников; ΔF_{gl} – изменение площади ледников; ΔF_{ab} – изменение площади области абляции; ΔF_{mor} – изменение площади морены; ΔF_{ice} – изменение площади открытого льда.

для климатического анализа — месячные суммы осадков (31 пункт в интервале 350–4034 м над ур. моря), а также средние значения температуры воздуха (20 пунктов в интервале 394–3450 м над ур. моря) и упругости водяного пара в воздухе (шесть пунктов в интервале 847–3017 м над ур. моря). Как видно на рис. 4, большая часть ГМС сосредоточена в бассейнах Большой и Малой Алматинки, что может влиять на территориальную репрезентативность зависимостей на рис. 2.

Гидрологические характеристики. Данные по изменению параметров гидрологического режима в табл. 1 были дополнены величинами модулей годового Mo_y и вегетационного Mo_v стока для бассейнов рек на северном склоне Заилийского Алатау и рейтинговыми оценками межбассейновых связей Mo_y , Mo_v и средних расходов воды Q_y , Q_v за годовой (y) и (v) — вегетационный периоды (см. табл. 3). Рейтинги получены путём определения и суммирования коэффициентов корреляции значений Mo_y , Mo_v и Q_y , Q_v за 1946–2005 гг. в каждом бассейне со всеми остальными, а также с суммами расходов \bar{Q}_y , \bar{Q}_v по всем бассейнам и региональными величинами модулей стока Mo_y , Mo_v за год и вегетационный периоды. Размерность Mo_y и Mo_v — л/с км², для расчёта использован объём стока за календарный год и вегетационный (апрель–сентябрь) интервал времени в каждом бассейне. Для определения региональных значений Mo_y , Mo_v используются суммарные объёмы \bar{Q}_y , \bar{Q}_v годового и вегетационного стока и сумма площадей до замыкающих гидростворов по всем бассейнам. Как видно, наивысший рейтинг пространственной репрезентативности стока оказался у бассейна р. Тургень. Бассейн р. Малой Алматинки занял второе и третье места в общем списке, что позволяет считать гидрометеорологические данные наблюдений в этом частном бассейне достаточно репрезентативными для северного склона Заилийского Алатау.

При сравнении объёма стока, измеренного на гидропостах и рассчитанного по уравнению (1), необходимо учитывать возможное поверхностное изъятие воды в пределах площади F_{bas} для обеспечения нужд многочисленных потребителей. Более или менее пригодная информация по этому вопросу доступна только для бассейна Малой Алматинки. В итоге, после анализа и обобщения материалов Управления природных ресурсов и водоканала «Су Желису», Казгидро-

мета и гидрогеологов [20–22], было принято, что в 1946–1975 и 1976–2005 гг. суммарные потери поверхностного стока выше гидропоста г. Алматы составляли приблизительно соответственно 20 и 24% годового стока. Эти оценки за неимением лучшего были распространены на другие речные бассейны на северном склоне Заилийского Алатау. Определённая часть воды фильтруется с поверхности бассейнов в глубокие подземные горизонты и выклинивается ниже/выше гидропостов. Однако практически учесть этот процесс при решении поставленной задачи пока невозможно.

Гляциологическая информация. Высотно-площадные параметры ледников, полученные в работах [2, 3, 5–7, 23] для ограниченного числа различных по полноте информации временных срезов, существенно отличается по временному разрешению от ежегодных месячных средних гидрологических и климатических сведений, имеющих в базах данных [9–11, 19] и справочниках. Исходные данные по каждому леднику, доступные для пользователей и сравнимые по набору морфометрических характеристик, есть только в [1, 8] для 1955 и 1990 гг. Данные в Каталоге [1], подготовленном по материалам аэрофотосъёмки, условно отнесены к 1955 г., хотя аэрофотоснимки этого года использованы для 106 ледников из 251. Для двух ледников данные привязаны к 1953 г., для трёх — к 1964 г., а в 140 случаях дата аэрофотосъёмки в Каталоге [1] отсутствует. По сравнению с Каталогом 1955 г. аналогичная по составу и более качественная сводка морфометрических параметров ледников, относящихся к 1990 г., была опубликована П.А. Черкасовым [8]. В Каталоге 1990 г. один из основных показателей режима ледника — высота фирновой границы Z_{fg} — во всех случаях рассчитан по методу Куровского как средняя многолетняя величина. Этот же метод использован для большинства ледников в Каталоге 1955 г. Коль скоро Z_{fg} в Каталогах 1955 и 1990 гг. отражает средние многолетние условия режима ледников, есть достаточные основания распространить этот принцип и на другие высотно-площадные параметры (Z_e , Z_b , Z_{uml} , F_{mor} , F_{ice}), перечисленные здесь. В итоге, тридцатилетние интервалы 1946–1975 и 1976–2005 гг. приняты как временные границы, к которым в качестве средних многолетних величин относятся морфометрические параметры ледников соответственно в Каталогах 1955 и 1990 гг.

Гидрографические и гляциологические характеристики основных речных бассейнов на северном склоне Заилийского Алатау приведены в табл. 2. Суммарная площадь оледенения F_{gl} в этих бассейнах в 1946–1975 гг. равна $306,6 \text{ км}^2$, а в 1975–2005 гг. составила $253,0 \text{ км}^2$, т.е. площадь сократилась на $53,6 \text{ км}^2$. Как видно из табл. 2, скорость сокращения F_{gl} и отдельных её составляющих F_{ab} , F_{mor} и F_{ice} на северном склоне Заилийского Алатау различна. Характерные свойства региональной динамики оледенения в 1946–2005 гг. — увеличение площади моренного покрова на ледниках и уменьшение площади открытого льда, что, при прочих равных условиях, приводит к снижению объёма ледникового стока. Несогласованность значений F_{gl} и F_{ab} в бассейне Узункаргалы с общей картиной динамики может быть связана с качеством исходных данных или погрешностями дешифрирования границ ледников. Изменение числа ледников N_{gl} в табл. 2 на региональном уровне согласуется с сокращением площади, хотя в отдельных случаях на этот показатель влияет распад ледников на отдельные части.

Из формул (2) и (3) следует, что опорными точками на ледниках для расчёта объёмов таяния льда под мореной, открытого льда, старого фирна и летнего снега служат средние взвешенные высоты \tilde{Z} для интервалов $Z_e - Z_{uml}$, $Z_{uml} - Z_{fg}$, $Z_e - Z_{fg}$, и $Z_{fg} - Z_b$. Значения высот на границах перечисленных интервалов как часть входной информации, используемой для определения \tilde{Z} , есть в справочниках [1, 8, 12]. Площади F_{ab} , F_{mor} , F_{ice} получены по следующим выражениям:

$$F_{ab} = F_{gl} 0,5 \{1 + \tanh[(Z_{fg} - 0,99Z_{fg} - 0,05)/0,486F_{gl}^{0,486}]\}; \quad (25)$$

$$F_{mor} = F_{ab} - F_{open}; \quad (26)$$

$$F_{ice} = F_{gl} - F_{mor}$$

Эмпирическая формула (25), предложенная в работе [24], описывает гиперболическим тангенсом распределение площади ледника по высоте. Из неё следует, что в среднем многолетнем на площадь абляции приходится примерно половина общей площади ледника. Этот результат согласуется с определением средней высоты фирновой границы Z_{fg} для стационарных ледников по методу Куровского. Для расчёта F_{mor} по

формуле (26) используется параметр F_{open} из Каталогов [1, 8]. Приемлемость описанного способа идентификации средних многолетних выотно-площадных характеристик подтверждена сравнением наших данных для 1976–2005 гг. с измеренными [3] средними значениями открытой площади оледенения F_{open} на северном склоне Заилийского Алатау в 1974–2008 гг. Оказалось, что из десяти случаев только для бассейнов рек Большая Алматинка и Каскелен разница между сравниваемыми значениями F_{open} оказалась более 2 км^2 . По нашему мнению, причина такой разницы состоит в значительном преувеличении F_{open} в этих бассейнах по данным [3]. Это косвенно подтверждается сравнением площади F_{open} для 1955 г. в работе [3] и Каталоге [1].

Климатическая информация. Для пространственной экстраполяции осадков, температуры и влажности воздуха необходимы многолетние ряды метеорологических наблюдений в опорных пунктах и соответствующие эмпирические параметры. В нашей работе основной источник месячных метеорологических данных — Справочники и Ежемесячники Казгидромета и частично наблюдения на сети суммарных осадкомеров. Кроме того, существуют глобальные и региональные базы средних значений и рядов метеорологических элементов в узлах регулярной сетки с шагом $0,25-0,5^\circ$ по долготе и широте. Наиболее полная по составу глобальная база данных CRU TS 3.1 [10] охватывает 1900–2014 гг. и содержит месячные значения средней, минимальной и максимальной температуры воздуха, осадков, облачности и упругости водяного пара. Квадрат коэффициента корреляции средней температуры воздуха за отдельные месяцы периода май–сентябрь на 11 ГМС Центральной Азии, расположенных в интервале высот $1,502-3,347 \text{ м}$ над ур. моря с данными в ближайших узлах из базы данных CRU TS 3.1 составил от $0,71$ до $0,95$, что подтверждает вполне приемлемое качество этой базы.

Проанализированы рассчитанные для территории Центральной Азии [13] средние многолетние месячные значения температуры воздуха и осадков в течение года соответственно на четырёх и десяти уровнях высоты над ур. моря в пределах $35-44^\circ \text{ с.ш.}$ и $65-81^\circ \text{ в.д.}$ с интервалом $0,25^\circ$ по долготе и широте. Перед тем, как объединять сведения из сеточных климатических архивов с

данными наблюдений на ГМС, оба источника проверялись на совместимость путём построения общей корреляционной связи с конкретной функцией. Для получения эмпирических формул (10)–(18) использованы частные выборки из следующего общего архива исходных данных для северного склона Заилийского Алатау: 25 ГМС; 31 суммарный осадкомер; годовая величина аккумуляции на высоте фирновой границы для 11 групп ледников Тянь-Шаня, рассчитанная по методу М.И. Геткера [25]; семь пунктов из сеточной климатической базы данных [10].

Независимая проверка результатов пространственной экстраполяции средней летней температуры воздуха T_s выполнена по наблюдениям на 14 ГМС Киргизгидромета, расположенных на смежной территории в интервале 823–3225 м над ур. моря. В качестве базового пункта при экстраполяции T_s использована ГМС Алматы. Установлено, что в 11 случаях разница между рассчитанной и измеренной T_s не превысила $0,5^\circ\text{C}$, в трёх

была больше $0,5^\circ\text{C}$ и меньше $1,1^\circ\text{C}$. Аналогичная проверка локальных формул для расчёта годовой и сезонной сумм осадков не проводилась ввиду существенной неоднородности поля осадков на территории, прилегающей к Заилийскому Алатау. Перечисленные общедоступные источники входной информации делают достаточно обоснованными расчёты составляющих водного баланса в бассейнах рек на северном склоне Заилийского Алатау по формулам (10)–(18).

Для исследования временного изменения средних за 30-летние периоды месячных значений осадков P и температуры T воздуха на северном макросклоне Заилийского Алатау использованы данные ГМС Алматы за 1887–2006 гг. как базового пункта при определении составляющих водного баланса в рассматриваемом регионе. Анализ рис. 5, характеризующего периодные отклонения в 1887–2006 гг. месячных величин P и T от норм, служит основанием для следующих выводов:

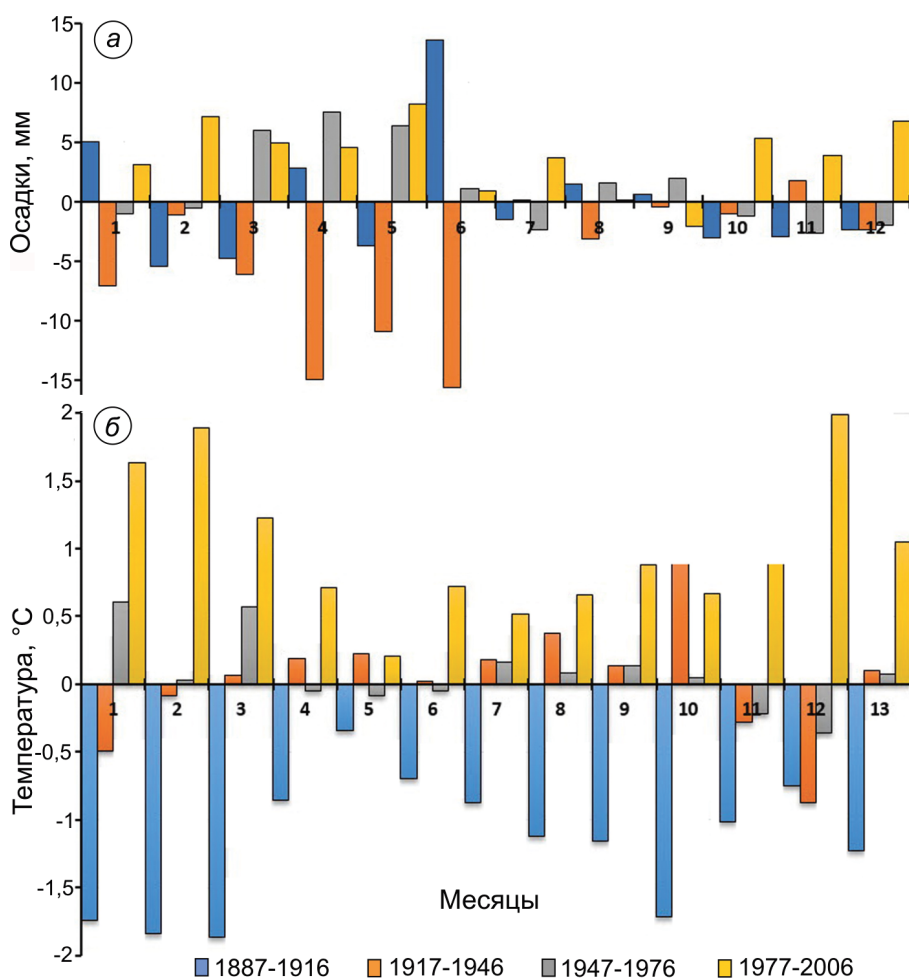


Рис. 5. Отклонения средних месячных величин осадков и температуры воздуха по 30-летним периодам относительно средних многолетних за 1887–2006 гг. По данным на ГМС Алматы: *a* – средние месячные суммы осадков; *б* – средняя месячная температура воздуха (№ 13 – в среднем за год)

Fig. 5. Deviation of the mean monthly values of precipitation and air temperature on 30-year periods with respect to long-term average for 1887–2006. According to the MST Almaty GMO: *a* – average monthly precipitation totals; *b* – average monthly temperature (№ 13 – in average per year)

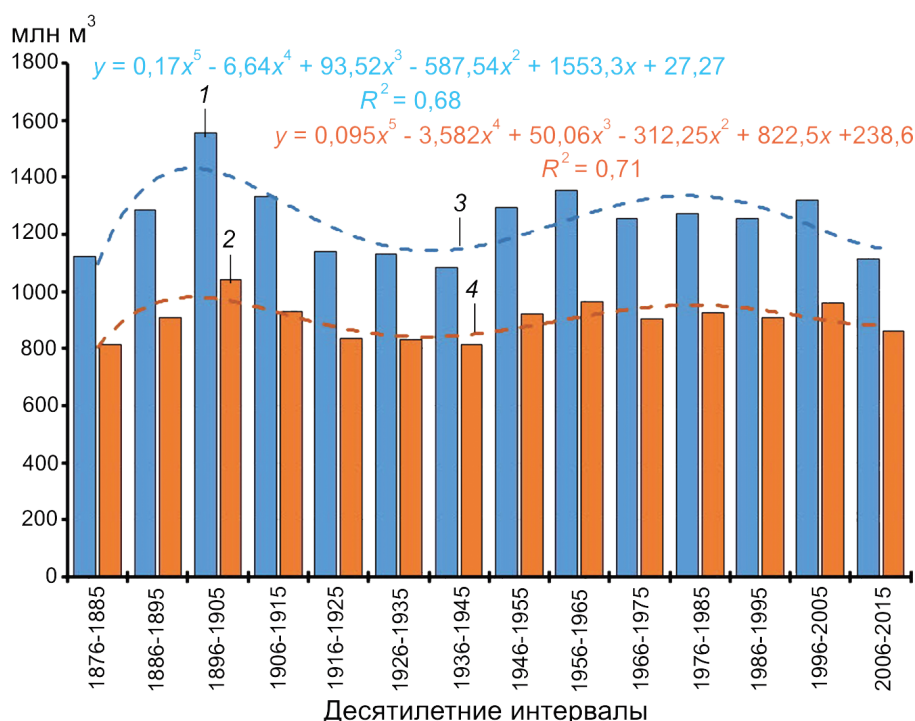


Рис. 6. Изменение средних величин годового (1, 3) и вегетационного (2, 4) стока в бассейнах рек на северном склоне Заилийского Алатау в 1876–2015 гг.

Fig. 6. Changes in average values of flow for annual (1, 3) and vegetation period (2, 4) in river basins on the northern slope of the Zailiysky Alatau Range in 1876–2015

1) наибольшие отклонения месячных сумм осадков от среднего за 1887–2006 гг. наблюдаются в зимне-весенний период, что оказывает разное по знаку влияние на объёмы годового и вегетационного стока;

2) отклонения осадков летне-осеннего периода (июнь–ноябрь) от многолетней нормы отличаются небольшими колебаниями и соответственно однообразным воздействием на формирование снегового и ледникового питания рек;

3) отклонения средней месячной температуры воздуха от нормы за 1887–2006 гг. в зимне-весенний и осенний периоды подвержены значительным изменениям по знаку и величине. Особенно это заметно в 1887–1916 и 1977–2006 гг. В эти же периоды наблюдалось противоположное по знаку отклонение средней температуры воздуха в летние месяцы.

Сглаженный по 10-летним периодам суммарный эффект аномалий осадков и температуры воздуха на годовой (январь–декабрь) и вегетационный (апрель–сентябрь) сток рек на северном склоне Заилийского Алатау иллюстрирует рис. 6. Для построения графиков использо-

ваны уравнения связи объёмов стока с годовой суммой осадков P_y и средней летней температурой воздуха T_s на ГМС Алматы. При наличии ожидаемых значений P_y и T_s по этим уравнениям может быть выполнен средний за десятилетие прогноз годового и вегетационного стока.

Результаты и обсуждение

Гидрологическая сущность исследования.

В работе представлены параметры измеренных многолетних рядов годового Q_y и сезонного объёмов стока Q_v . Аналогичные сведения невозможно получить для ледникового стока из-за отсутствия ежегодных данных по морфометрии оледенения. Кроме того, осреднённые значения Q_y и Q_v использованы как для поиска связей с климатическими факторами, так и с целью замыкания уравнения годового водного баланса и оценки качества расчёта объёмов осадков, испарения и ледникового питания рек. Результаты регионального исследования пространственно-временного изменения состав-

Таблица 3. Модули стока и рейтинги межбассейновых связей модулей и объёмов годового и вегетационного стока*

Бассейны	$\Sigma C_{or} Mo_y$	Бассейны	$\Sigma C_{or} Mo_y$	Бассейны	$\Sigma C_{or} Q_y$	Бассейны	$\Sigma C_{or} Q_y$	Бассейны	Mo_y	Mo_y
Q_y	7,95	Q_y	8,33	Q_y	8,22	Q_y	8,55	Q_y, Q_y	15,5	22,3
Тургень	6,65	Тургень	7,45	Тургень	6,98	Тургень	7,70	Узункаргалы	10,9	14,0
Мал. Алматинка	6,57	Аксай	7,44	Мал. Алматинка	6,91	Аксай	7,38	Чемолган	7,7	10,1
Аксай	6,41	Мал. Алматинка	6,97	Аксай	6,71	Мал. Алматинка	7,25	Талгар	23,1	34,3
Бол. Алматинка	6,18	Узункаргалы	6,90	Бол. Алматинка	6,48	Узункаргалы	7,13	Иссык	19,7	28,5
Чемолган	6,06	Иссык	6,65	Чемолган	6,26	Иссык	6,83	Тургень	11,6	17,9
Иссык	5,94	Чемолган	6,31	Иссык	6,25	Проходная	6,63	Бол. Алматинка	18,7	22,8
Узункаргалы	5,88	Талгар	5,87	Узункаргалы	6,04	Чемолган	6,49	Мал. Алматинка	17,0	24,2
Талгар	5,78	Бол. Алматинка	5,82	Талгар	6,04	Талгар	6,10	Каскелен	14,2	21,0
Проходная	4,12	Проходная	5,15	Проходная	5,54	Бол. Алматинка	6,04	Аксай	17,2	25,7
Каскелен	2,94	Каскелен	3,57	Каскелен	3,53	Каскелен	4,17	Проходная	19,1	27,4

* Q_y, Q_y — соответственно индексы суммы годовых и вегетационных объёмов стока по всем бассейнам; $\Sigma C_{or} Mo_y$ — сумма коэффициентов межбассейновой корреляции модулей годового стока; $\Sigma C_{or} Mo_y$ — то же для вегетационного стока; $\Sigma C_{or} Q_y$ — сумма коэффициентов межбассейновой корреляции объёмов годового стока и $\Sigma C_{or} Q_y$ — для вегетационного стока; Mo_y и Mo_y — соответственно модули годового и вегетационного стока в л/с км².

Таблица 4. Параметры временных рядов годового и вегетационного стока за 1933–2008 гг.*

Индекс	Объём стока, млн м ³			Годы		C_v	Асимметрия	Экссесс
	mid	max	min	max	min			
ΣQ_y	1275,4	1595,8	889,1	1959	1995	0,12	0,08	–0,30
ΣQ_y	919,3	1178,7	612,5	1958	1995	0,14	0,12	–0,37

* ΣQ_y — суммарный годовой объём стока; ΣQ_y — суммарный объём стока за апрель–сентябрь; C_v — коэффициент вариации.

ляющих уравнения водного баланса описаны далее в форме обобщённых выводов по нескольким научно-прикладным вопросам. Основанием для обобщений служат материалы табл. 1–5.

Пространственная вариация модулей годового и вегетационного стока (см. табл. 3) отражает различие водоносности речных бассейнов. Из этих данных следует необходимость разработки индивидуальных методов расчёта и прогноза стока как функции климатических факторов для каждого водосбора. Однако сеть пунктов ГМС на северном склоне Заилийского Алатау сосредоточена только в бассейнах Большой и Малой Алматинки. Для выяснения обоснованности экстраполяции данных ГМС в этих бассейнах выполнен рейтинговый анализ межбассейновой корреляции объёмов Q_y и Q_y за 1946–2005 гг. В результате наивысший рейтинг пространственной репрезентативности данных по стоку получен для бассейна р. Тургень, где многолетний ряд гидрологических измерений начинается с 1933 г. Свойство репрезентативности стока в этом бассейне позволило получить уравнения $\Sigma Q_y = f(Q_y - \text{р. Тургень})$ и $\Sigma Q_y = f(Q_y - \text{р. Тургень})$ с коэффициентами детерминации соответственно 0,69 и 0,77 и в конечном счёте восстановить

многолетние ряды ΣQ_y и ΣQ_y за 1933–2008 гг., которые пригодны для гидрологических расчётов и прогнозов водных ресурсов на северном склоне Заилийского Алатау. Здесь ΣQ_y и ΣQ_y — соответственно суммарные объёмы годового и вегетационного стока для всех десяти рассматриваемых речных бассейнов. Статистические параметры рядов ΣQ_y и ΣQ_y приведены в табл. 4. Определение автокорреляционной функции рядов ΣQ_y и ΣQ_y показало, что при сдвиге назад во времени от 1 до 15 лет зависимость между смежными членами ряда колеблется от –0,17 до 0,14. Тест на соответствие этих рядов нормальному распределению дал положительный результат только для ряда ΣQ_y .

В бассейне р. Тургень нет ГМС, поэтому для реконструкции рядов ΣQ_y и ΣQ_y за пределами 1933–2008 гг. использованы многолетние данные по осадкам и температуре воздуха на ГМС Алматы за 1886–2015 гг. По рейтинговому показателю пространственной репрезентативности годового и вегетационного стока р. Малая Алматинка занимает 2–3 места в списке всех бассейнов на северном склоне Заилийского Алатау, что позволило использовать климатические факторы стока в этом бассейне для реконструкции рядов ΣQ_y

Таблица 5. Составляющие водного баланса в частных бассейнах и в целом для северного склона Заилийского Алатау*

Бассейн	Годы	Индексы													
		P_y	E_y	Q_y	Q_{y+}	Q_v	W_{gl}^1	$W_{gl}^1, \%$	$W_{gl}^2, \%$	$W_{gl}^3, \%$	$Q(i-iii)$	W_{Bal}	dW	$dW, \%$	K_R
Тургень	1946–1975	0,682	0,325	0,227	0,271	0,176	0,018	6,6	10,1	15,4	0,021	0,396	0,125	46,0	0,61
	1976–2005		0,324	0,228	0,283	0,175	0,012	4,2	6,7	10,3	0,020	0,389	0,106	37,5	0,62
Талгар	1946–1975	0,496	0,211	0,326	0,390	0,240	0,053	13,5	22,0	30,9	0,032	0,370	0,019	4,9	0,96
	1976–2005		0,234	0,322	0,400	0,241	0,045	11,2	18,6	26,0	0,030	0,338	0,063	15,7	1,05
Узункаргалы	1946–1975	0,381	0,164	0,126	0,151	0,076	0,006	3,8	7,5	12,0	0,016	0,240	0,089	59,0	0,56
	1976–2005		0,182	0,112	0,139	0,075	0,004	3,2	5,9	8,2	0,016	0,220	0,081	58,1	0,55
Каскелен	1946–1975	0,302	0,150	0,138	0,165	0,101	0,006	3,7	6,1	8,4	0,015	0,172	0,007	4,4	0,88
	1976–2005		0,168	0,128	0,159	0,098	0,005	3,3	5,3	6,6	0,014	0,153	–0,006	–4,0	0,92
Иссык	1946–1975	0,275	0,123	0,162	0,193	0,114	0,023	12,1	20,4	28,2	0,017	0,192	–0,001	–0,5	0,92
	1976–2005		0,137	0,156	0,194	0,116	0,018	9,3	15,5	21,6	0,017	0,173	–0,021	–11,0	1,01
Большая Алматинка	1946–1975	0,171	0,074	0,095	0,114	0,114	0,014	12,3	24,2	37,0	0,015	0,127	0,013	11,5	0,85
	1976–2005		0,082	0,088	0,109	0,116	0,008	6,9	15,6	22,5	0,012	0,108	–0,001	–0,7	0,91
Чемолган	1946–1975	0,170	0,084	0,043	0,052	0,055	0,001	1,4	1,3	6,2	0,008	0,078	–0,026	–50,9	0,61
	1976–2005		0,094	0,040	0,050	0,053	0,001	1,3	1,2	6,4	0,006	0,069	–0,019	–37,6	0,64
Акса́й	1946–1975	0,147	0,065	0,072	0,086	0,054	0,007	7,8	12,6	18,3	0,010	0,099	0,013	15,4	0,81
	1976–2005		0,072	0,074	0,092	0,055	0,005	5,6	9,3	12,5	0,010	0,090	–0,002	–2,0	0,92
Малая Алматинка	1946–1975	0,128	0,063	0,070	0,084	0,049	0,006	7,0	12,1	19,2	0,009	0,080	–0,004	–4,8	0,99
	1976–2005		0,063	0,057	0,070	0,042	0,004	5,5	9,3	15,1	0,006	0,074	0,004	5,2	0,83
Проходная	1946–1975	0,092	0,039	0,050	0,059	0,036	0,003	4,9	8,1	12,1	0,006	0,062	0,002	4,2	0,88
	1976–2005		0,043	0,051	0,063	0,037	0,002	2,4	4,1	7,8	0,006	0,057	–0,006	–10,3	0,99
Все бассейны	1946–1975	2,812	1,282	1,308	1,564	0,957	0,136	8,7	14,2	18,8	0,150	1,816	–0,252	–16,1	0,80
	1976–2005		1,381	1,257	1,561	0,941	0,104	6,6	11,0	13,7	0,136	1,644	–0,083	–7,0	0,80

* P_y – осадки (y здесь и далее – символ года); E_y – испарение; Q_y – сток на замыкающем гидростворе; Q_{y+} – сумма стока, измеренного на гидропосту, и водозабора из реки; Q_v – сток за вегетационный период; W_{gl}^1 – объём ледникового стока (таяние открытого льда и льда под мореной) за июнь–август; $W_{gl}^1, \%$ – то же в % от Q_{y+} ; $W_{gl}^2, \%$ – то же в % от Q_y ; W_{gl}^3 – то же в % от стока Q_s за июнь–август; $Q(i-iii)$ – сток за период январь–март; $W_{Bal} = P_y - E_y + W_{gl}^1 + Q(i-iii)$ – сток, рассчитанный по уравнению водного баланса; dW – разность W_{Bal} и Q_{y+} ; $dW, \%$ – то же в %; K_R – коэффициент трансформации в формуле (1). Размерность переменных $P_y, E_y, Q_y, Q_{y+}, Q_v, W_{gl}^1, Q(i-iii), W_{Bal}, dW$ – км³.

и ΣQ_y и предварительного поиска предикторов для прогноза ΣQ_y и ΣQ_v . Попытка получить расчётные и прогностические уравнения для определения ΣQ_y и ΣQ_v как функций годовой P_y и сезонных P_s (ноябрь–март, апрель–сентябрь) сумм осадков, средних за лето температуры воздуха T_s и упругости водяного пара в воздухе e_s не имела успеха. Однако после осреднения функций и аргументов за 10-летние интервалы были получены линейные уравнения для реконструкции рядов ΣQ_y и ΣQ_v по данным ГМС Алматы с коэффициентом детерминации 0,95 (ΣQ_y) и 0,85 (ΣQ_v) и среднеквадратичной ошибкой расчёта в млн м³ 11,3 (ΣQ_y) и 13,5 (ΣQ_v). Результаты реконструкции рядов ΣQ_y и ΣQ_v за 1886–2015 гг., пригодные для различных научно-прикладных исследований, иллюстрирует рис. 6.

Ледниковое питание рек и климатические факторы стока. За 1976–2005 гг. относительно предыдущего тридцатилетия 1946–1975 гг. общая площадь оледенения в бассейнах рек на северном склоне Заилийского Алатау сократилась на 53,6 км², площадь открытого льда уменьшилась на 52,1 км², а площадь сплошной морены на ледниках увеличилась на 9,0 км² (см. табл. 2). Это произошло на фоне незначительного уменьшения суммарного годового стока (с разнозначными отклонениями от общей суммы в отдельных бассейнах), слабого прироста годовой суммы осадков и стабильного роста средней летней температуры воздуха на ГМС Алматы. Эта ГМС принята в качестве базового пункта для пространственной экстраполяции температуры воздуха и упругости водяного пара в воздухе.

Ввиду отсутствия ежегодных данных об изменении морфометрических параметров оледенения определение составляющих уравнения (1) выполнено для десяти речных бассейнов по осреднённым значениям R , P , W_{gl} , E , ΔW за 1946–1975 и 1976–2005 гг. При этом использованы исходные данные и методики расчёта, изложенные в предыдущих разделах. Сводные оценки пространственно-временных изменений составляющих уравнения (1) содержатся в табл. 5. Прежде всего обращает на себя внимание практическая стабильность годового ΣQ_y и особенно вегетационного стока ΣQ_v в 1946–2005 гг., несмотря на сокращение ледникового питания W_{gl}^1 на 24% в 1976–2005 гг. относительно 1946–1975 гг. Это указывает на слабое влияние W_{gl}^1 на общую водоносность речных бассейнов на северном склоне Заилийского Алатау, что подтверждается незначительными вкладами W_{gl}^1 в объёмы ΣQ_y и ΣQ_v . Относительный вклад W_{gl}^1 возрастает примерно в два раза, если учитывать отношение объёмов W_{gl}^1 и речного стока Q_s за июнь–август, которое в условиях северного склона Заилийского Алатау наиболее точно отражает роль ледникового питания в формировании сезонного речного стока. Однако и в этом случае средние значения W_{gl}^1/Q_s в 1946–1975 и 1976–2005 гг. были соответственно равны 18,8 и 13,7%. Только в бассейнах рек Талгар, Иссык и Большая Алматинка средние значения W_{gl}^1/Q_s в 1946–1975 и 1976–2005 гг. изменялись в среднем от 21 до 37%.

Определения объёмов ледникового стока и его вклада в питание рек на северном склоне Заилийского Алатау содержатся также в работах [2, 23, 26]. В отличие от использованной в нашей работе трактовки понятия «ледниковый сток», обусловленной применением уравнения (1), авторы [2, 23, 26] относят к нему, помимо таяния льда в области абляции, объёмы жидких осадков на площади оледенения и таяния: снега и фирна в области аккумуляции, сезонного снега в области абляции, подледникового таяния на нижней поверхности ледников. Следовательно, ввиду различия понятий, а также методов расчёта и верификации невозможно прямое сравнение данных табл. 6 с результатами в [2, 23, 26], поскольку оно будет некорректным.

По мнению некоторых гидрогеологов [20], существует только две составляющих стока рек на северном склоне Заилийского Алатау – под-

земное питание и ледниковый сток с соотношением вкладов 78 и 22%. С этой точкой зрения нельзя согласиться, поскольку понятие «подземное питание» включает в себя способ транзита воды в речном бассейне, образовавшейся благодаря выпадению атмосферных осадков на поверхность водосбора и таянию многолетних запасов льда. Гораздо важнее, что члены уравнения (1) P , E , W_{gl} и ΔW характеризуют условия формирования поверхностного стока, а объём его R , измеренный на замыкающем гидростворе в предгорной зоне Заилийского Алатау, содержит, как показано в [20], объём выклинивания воды из глубоких подземных горизонтов, сбросы с полей орошения и другие источники. Следовательно, необходимо совместное решение уравнений поверхностного и подземного водного баланса, которое должно быть предметом специального исследования и базироваться на соответствующей научно-информационной основе. Причины сравнительно небольшой значимости W_{gl}^1 за год и апрель–сентябрь заключаются в безусловном преобладании снегового питания рек над ледниковым, малой относительной доли площади оледенения, тенденции увеличения суммы осадков за год P_y и постоянстве её за вегетационный период P_s , которая на ГМС Алматы в 1946–1975 и 1976–2005 гг. была равной (в мм): 650 (P_y 1946–1975 гг.) и 677 (P_y 1976–2005 гг.) и 378 (P_s 1946–1975 гг.) и 372 (P_s 1976–2005 гг.). Тенденцию многолетнего изменения месячных сумм осадков на ГМС Алматы иллюстрирует также рис. 5, а. Регрессионный анализ зависимостей $\Sigma Q_y = f(P_y, P_s, T_s, e_s)$ и $\Sigma Q_v = f(P_y, P_s, T_s, e_s)$ показал, что подавляющий вклад в описание дисперсии функции принадлежит осадкам.

Оценки качества расчётов составляющих водного баланса в 1946–1975 и 1976–2005 гг. на северном склоне Заилийского Алатау, выполненные путём сравнения измеренного годового стока с суммой составляющих правой части уравнения (1), содержатся в табл. 5. Как видно, в семи случаях из десяти относительная разность W_{Bal} и Q_{y+} изменяется от 0,5 до 12%, что несомненно вполне удовлетворительный результат локального моделирования годовых и сезонных осадков, испарения, средней летней температуры воздуха, упругости водяного пара в воздухе, объёмов таяния открытого льда и льда под

сплошным слоем морены. Причина существенного отклонения между измеренным и рассчитанным стоком в трёх бассейнах пока неясна и служит предметом дальнейшего анализа. В частности, в одном случае (бассейн р. Узункаргалы) в 1976–2005 гг. по сравнению с предыдущим 30-летием по непонятной причине произошло увеличение общей площади ледников на 2,08 км², области абляции на 1,03 км², площади моренного покрова на 3,52 км² и уменьшение площади открытого льда на 3,44 км². Здесь — явная ошибка в исходных данных. В другом случае (бассейн р. Тургенъ) сравнение в 1946–1975 и 1976–2005 гг. «климатического стока», т.е. разности осадков и испарения, с рассчитанным водным балансом даёт ошибку соответственно всего –8,4 и –10,3%, что существенно не лучше оценок в табл. 5.

Выводы

1. Региональные линейные зависимости сезонных величин осадков $P = P(z)$, температуры воздуха $T = T(z)$, упругости водяного пара в воздухе $e = e(z)$ и нелинейная зависимость для годовых осадков $P = P(z^2, z)$ как функция высоты

з оказались достаточно эффективными для описания и расчёта пространственных изменений осадков, испарения и ледникового стока в течение принятых временных периодов 1946–1975 и 1976–2005 гг.

2. На северном склоне Заилийского Алатау реконструированы многолетние ряды суммарного годового и вегетационного стока за 1876–2015 гг., пригодные для региональных научно-прикладных исследований колебаний водоносности рек.

3. Количественно обоснована репрезентативность стока в бассейне р. Малая Алматинка и данных наблюдений на ГМС Алматы для моделирования и расчёта водных ресурсов на северном склоне Заилийского Алатау.

4. Полученные локальные и региональные оценки объёмов и вкладов в сток талой снеговой и ледниковой воды соответствуют характерным для центральной Азии условиям формирования стока рек снегово-ледникового питания.

5. Установлено, что сокращение площади открытого льда и объёма ледникового стока в 1976–2005 гг. относительно 1946–1975 гг. практически не повлияло на водоносность рек на северном склоне Заилийского Алатау в течение годового и вегетационного периодов.

Литература

1. Каталог ледников СССР. Т. 13. Вып. 2. Ч. 1. Бассейны левых притоков р. Или от устья р. Курты до устья р. Тургенъ. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 79 с.
2. Вилесов Е.Н., Уваров В.Н. Эволюция современного оледенения Заилийского Алатау в XX веке. Алматы: Казак Университет, 2001. 252 с.
3. Кокарев А.Л., Шестерова И.Н. Изменение ледниковых систем северного склона Заилийского Алатау за полувековой период // Лёд и Снег. 2011. № 4. С. 39–46.
4. Макаревич К.Г., Вилесов Е.Н., Головкова Р.Г., Денисова Т.Я., Шабанов П.Ф. Ледники Туяксу. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 170 с.
5. Северский И.В., Токмагамбетов Т.Г. Современная динамика оледенения Северного Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау // МГИ. 2005. № 98. С. 3–9.
6. Северский И.В., Вилесов Е.Н., Кокарев А.Л., Шестерова И.Н., Морозова В.И., Козутенко Л.В.,

References

1. *Katalog lednikov SSSR. Tom 13. Vyp. 2. Chast' 1. Basseyny levyykh pritokov r. Ili ot ust'ya r. Kurty do ust'ya r. Turgen'.* USSR Glacier Inventory. V. 13. Issue. 2. Pt. 1. Basins of left tributaries of Ili river from the mouth of Kurty river. to the mouth of Turgen' river. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1967: 79 p. [In Russian].
2. *Vilesov E.N., Uvarov V.N. Evolyutsiya sovremennogo oledeneniya Zailiyskogo Alatau v 20 veke.* Evolution of preseny-day glaciation in Zailiysky Alatau over the 20 century. Almaty: Kazak University, 2001: 252 p. [In Russian].
3. *Kokarev A.L., Shesterova I.N.* Changing of glacier systems at the northern slope of the Zailiysky Alatau Mountains over half a century. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2011, 4: 39–46. [In Russian].
4. *Makarevich K.G., Vilesov E.N., Golovkova R.G., Denisova T.Ya., Shabanov P.F. Ledniki Tuyuksu.* Glaciers of Tuyuksu. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 170 p. [In Russian].
5. *Severskiy I.V., Tokmagambetov T.G.* The current dynamics of glaciation in the Northern Tien Shan and Yungar Alatau. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 2005, 98: 3–9. [In Russian].

- Усманова З.С. Ледниковые системы Балкаш-Алакольского бассейна: состояние, современные изменения // Вопросы географии и геоэкологии. 2012. № 2. С. 31–40.
7. Токмагамбетов Г.А. Ледники Зайлиского Алатау. Алма-Ата: Наука, 1976. 368 с.
8. Черкасов П.А. Современное состояние ледников Или-Балхашского региона // Современное экологическое состояние бассейна озера Балхаш / Ред. Т.К. Кудеков. Алматы: Казанат, 2002. 388 с.
9. Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Schamm K., Schneider U., Ziese M. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present // Earth System Science Data. 2013. № 5. P. 71–99.
10. Mitchell T., Jones P. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // Intern. Journ. of Climatology. 2005. № 25. P. 693–712.
11. 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/
12. World Glaciers Inventory. 2009. http://nsidc.org/data/glacier_inventory/ <ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G01130>
13. Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Отв. ред. В.М. Котляков. М.: Наука, 2006. 488 с.
14. Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 237 с.
15. Konovalov V.G. Computations of melting under moraine as a part of regional modeling of glacier runoff // IAHS Publ. 2000. № 264. P. 109–118.
16. Konovalov V.G. New approach to estimate water output from regional populations of mountain glaciers in Asia // Geography. Environment. Sustainability. 2015. V. 8. № 2 P. 13–29.
17. Хромова Т.Е., Медведев А.А., Муравьев А.А., Зверкова Н.М. Электронный атлас «Снег и лёд на Земле» // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 2. С. 5–8. doi:10.15356/2076-6734-2015-2-5-8
18. Xu C.-Y., Singh V.P. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods // Hydrological Processes. 1998. V. 12. P. 429–442.
19. Bodo B.A. Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union [FSU]. July. 2000.
20. Dzhabekov A.K., Bazarbaeva G.O. Peculiarities of groundwater formation in Trans-Ili Alatau. *Izvestiya NAN RK. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk*. Proc. of the National Academy of Sciences, Kazakhstan Republic.
6. Severskiy I.V., Vilesov E.N., Kokarev A.L., Shesterova I.N., Morozova V.I., Kogutenko L.V., Usmanova Z.S. Glacial systems of Balkhash-Alakol Basin: conditions and modern change. *Voprosy geografii i geoekologii*. Problems of Geography and Geoecology. 2012, 2: 31–40. [In Russian].
7. Tokmagambetov G.A. *Ledniki Zailiyskogo Alatau*. Glaciers in Zailisky Alatau. Alma-Ata: Nauka, 1976: 368 p. [In Russian].
8. Cherkasov P.A. Current status of glaciers in Ili-Balkhash region. In: *Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie basseyna ozera Balkhash*. Modern ecological state of the Lake Balkhash basin. Ed. T.K. Kudekov. Almaty: Kaganat, 2002: 388 p. [In Russian].
9. Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Schamm K., Schneider U., Ziese M. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. Earth System Science Data. 2013, 5: 71–99.
10. Mitchell T., Jones P. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. Intern. Journ. of Climatology. 2005, 25: 693–712.
11. 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/
12. World Glaciers Inventory. 2009. http://nsidc.org/data/glacier_inventory/. <ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/NOAA/G01130>
13. *Oledenenie Severnoy i Tsentralnoy Evrazii v sovremennuyu epokhu*. Glaciation in North and Central Eurasia at present time. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Nauka, 2006: 488 p. [In Russian].
14. Konovalov V.G. *Tayanie i stok s lednikov v basseynakh rek Sredney Azii*. Melting of glaciers and runoff in the basins of Central Asia rivers. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985: 237 p. [In Russian].
15. Konovalov V.G. Computations of melting under moraine as a part of regional modeling of glacier runoff. IAHS Publ. 2000, 264: 109–118.
16. Konovalov V.G. New approach to estimate water output from regional populations of mountain glaciers in Asia. Geography. Environment. Sustainability. 2015, 8 (2): 13–29.
17. Khromova T.E., Medvedev A.A., Muravev A.Ya., Zverkova N.M. Elektronnyi Atlas "Sneg i led na Zemle". Electronic atlas "Snow and ice on the Earth". *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (2): 5–8. doi: 10.15356/2076-6734-2015-2-5-8. [In Russian].
18. Xu C.-Y., Singh V.P. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. Hydrological Processes. 1998, 12: 429–442.
19. Bodo B.A. Monthly Discharges for 2400 Rivers and Streams of the former Soviet Union [FSU]. July. 2000.
20. Dzhabekov A.K., Bazarbaeva G.O. Peculiarities of groundwater formation in Trans-Ili Alatau. *Izvestiya NAN RK. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk*. Proc. of the National Academy of Sciences, Kazakhstan Republic.

20. Джакелов А.К., Базарбаева Г.О. Закономерности формирования подземных вод Заилийского Алатау // Изв. НАН РК. Сер. геологии и тех. наук. 2012. № 5. С. 38–44.
21. ТЭО «Кокжайлау». ПредОВОС. Т. 1. Редакция 3.2. Алматы, 2012. <http://www.almatytourism.kz>
22. Управление природных ресурсов и регулирования природопользования г. Алматы. www.almatyeco.gov.kz
23. Уваров Д.В., Мазур Л.П. Исследование ледникового стока р. Киши Алматы (Малая Алматинка) // Гидрометеорология и экология. 2013. № 3. С. 112–129.
24. Щетинников А.С. Морфология и режим ледников Памиро-Алая. Ташкент: изд. САНИГМИ, 1988. 219 с.
25. Геткер М.И. Методические рекомендации по определению характеристик режима снежного покрова в горах Средней Азии. Ташкент: изд. САНИГМИ, 1988. 47 с.
26. Чехонадская В.А., Токмагамбетов Г.А., Щукина Т.А. Объем ледникового стока рек бассейна Или // Режим ледников и снежных лавин Казахстана. Алма-Ата, 1979. С. 110–120.
- Series of Geology and Engineering Sciences. 2012, 5: 38–44. [In Russian].
21. ТЭО "Kokzhaylau". PredOVOS. V. 1. Version 3.2. Almaty, 2012. <http://www.almatytourism.kz>. ТЭО "Kokzhaylau". [In Russian].
22. *Upravlenie prirodnnykh resursov i regulirovaniya prirodopolzovaniya g. Almaty*. Natural Resources Management and Environmental Management of Almaty. www.almatyeco.gov.kz. [In Russian].
23. Uvarov D.V., Mazur L.P. *Issledovanie lednikovogo stoka r. Kishi Almaty (Malaya Almatinka)*. Gidrometeorologiya i ekologiya. Hydrometeorology and Ecology. 2013, 3: 112–129. [In Russian].
24. Shchetinnikov A.S. *Morfologiya i rezhim lednikov Pamiro-Alaya*. Morphology and glacier regime in the Pamirs-Alai. Tashkent: SANIGMI, 1988: 219 p. [In Russian].
25. Getker M.I. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu kharakteristik rezhima snezhnogo pokrova v gorakh Sredney Azii*. Guidelines to determine the characteristics of snow cover regime in the mountains of Central Asia. Tashkent: SANIGMI, 1988: 47 p. [In Russian].
26. Chekhonadskaya V.A., Tokmagambetov G.A., Shchukina T.A. The volume of glacial runoff of the Ili River basin. *Rezhim lednikov i snezhnykh lavin Kazakhstana*. Regime of glaciers and avalanches in Kazakhstan. Alma-Ata, 1979: 110–120. [In Russian].