



ИГРАН

Характеристики ледникового питания рек

Коновалов В.Г.

*Институт географии РАН (ИГРАН), Москва
vladgeo@gmail.com*



XIX Международная
конференция
«Современные проблемы
дистанционного
зондирования Земли
из космоса»,
15-19.11.2021

Необходимые для гидрологических и климатических расчетов и прогнозов многолетние ряды объема стока с площади дискретных множеств ледников в речных бассейнах могут быть получены только путем моделирования процесса водоотдачи ледников. Известным свойством внутригодового распределения стока горно-ледниковых речных бассейнов служит значительное увеличение стока в течение июня-сентября. Ранее В.Л.Шульц предложил [6] считать отношение δ объемов W либо средних расходов воды Q за периоды июль-сентябрь и март-июнь в качестве косвенной оценки значимости ледникового питания, т.е. $\delta = W(\text{VII-IX})/W(\text{III-VI})$. При этом средняя многолетняя величина δ была им использована как критерий для классификации рек по типу питания. В частности, при $\delta \geq 1,00$ питание реки отнесено к ледниково-снеговому типу, а при $0,99 > \delta \geq 0,27$ к снегово-ледниковому.

Далее представлены характеристики состояния и динамики водных ресурсов ряда речных бассейнов, основанные на расчете и анализе уравнений временных трендов индекса δ и расхода воды Q за периоды: год, июль-сентябрь, март-июнь. Исследование и решение поставленной задачи базируется на многолетних измерениях стока [7-9] на гидропостах в горной части бассейнов рек Евразии (Катунь, Баксан), Северной Америки (Юкон, Маккензи, Лиард), Центральной Европы (Рона, Инн), Азии (Пяндж, Вахш, Зеравшан, Нарын, Гунт, Сох).

Продолжительность рядов гидрологических данных на большинстве гидропостов превышала 70 лет, при минимуме 41 год и максимуме 115 лет. Высотно-площадные параметры совокупностей ледников в перечисленных бассейнах получены из источников [11-14] по данным обработки аэрофотосъемки и результатов дистанционного зондирования со спутников TERRA и Sentinel-2 [16,18]. Подробные характеристики названных выше речных бассейнов приведены в Таблице 1.

Для всех рассмотренных речных бассейнов рассчитаны следующие косвенные характеристики ледникового питания: среднее значение индекса δ , градиент уравнения временного линейного тренда для индекса δ , и средних расходов воды за год $Q(1-12)$ и интервалы июль-сентябрь $Q(7-9)$ и март-июнь $Q(3-7)$. В итоге анализа этих параметров установлено: по классификации Шульца 15 бассейнов из 18 относятся к ледниково-снеговому, остальные 3 к снегово-ледниковому типам формирования стока; градиент уравнения линейного тренда для индекса δ во всех случаях имеет отрицательное значение, что указывает на сокращение ледниково-снегового питания, точнее только его ледниковой составляющей; несмотря на это, годовой сток уменьшился только в трех бассейнах, а в остальных наблюдалось увеличение $Q(1-12)$, вследствие роста $Q(3-7)$, который перекрывал уменьшение $Q(7-9)$. Возможная причина роста $Q(3-7)$ - увеличение осадков в течение октября-июня на площади водосбора выше гидрологического поста, фиксирующего неискаженный речной сток.

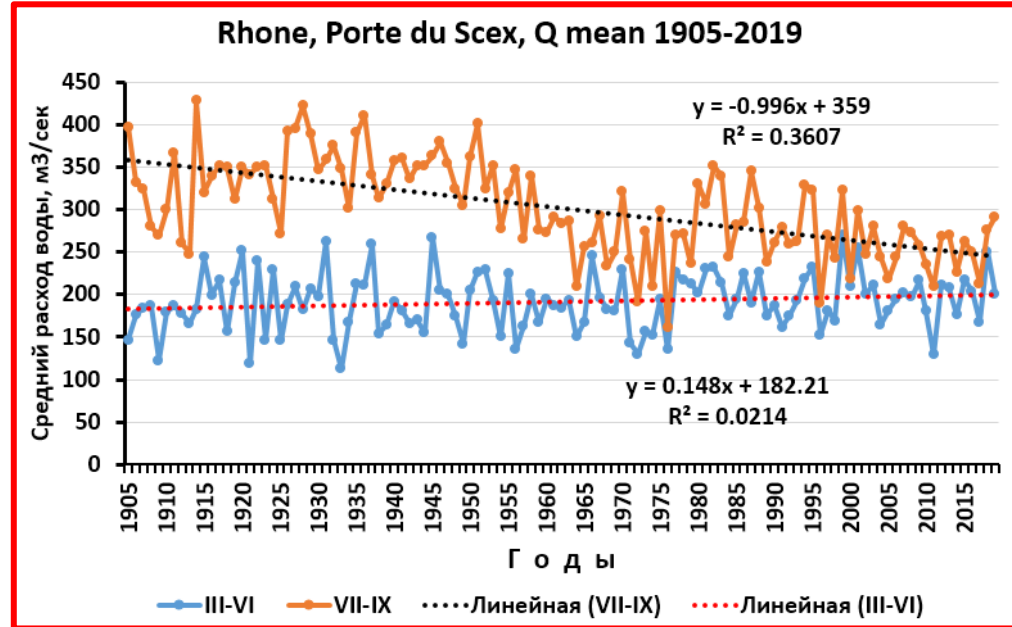
Из этих заключений следует необходимость более подробного исследования пространственно-временных изменений составляющих индекса δ и климатических факторов, влияющих на колебания стока (осадки, температура воздуха) в масштабе крупных речных бассейнов. Подготовка исходной информации для выполнения этой работы выявила существенную ограниченность и доступность внутригодовых и многолетних гидрологических и гляциологических данных, особенно в районах широкого распространения горно-ледниковых речных бассейнов (Азия, Северная и Южная Америка, Кавказ).

Т а б л и ц а 1. Региональные характеристики оледенения и изменения стока в речных бассейнах

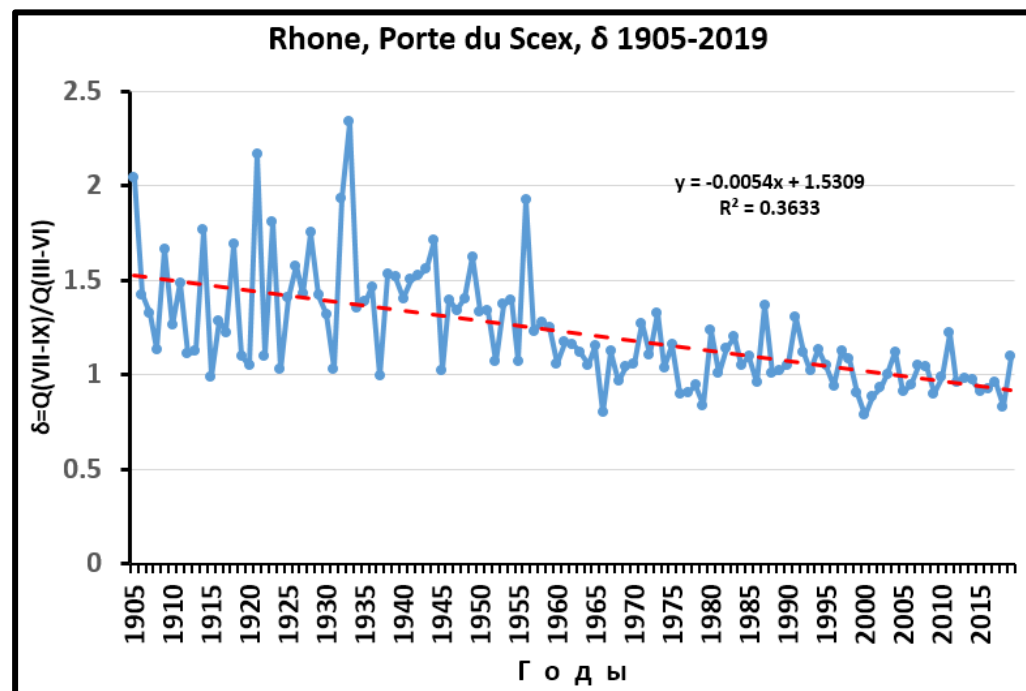
Регион	река	гидропост	Характеристики							Градиент уравнения линейного тренда $y=f(t)$			
			F_{bas} , км ²	F_{gl} , км ²	F_{gl}/F_{bas} , %	Q(1-12)	годы	Ny	δ	δ	Q(7-9)	Q(3-6)	Q(1-12)
Евразия	Катунь	Сростки	58400	525	0.90	611.6	1936-2000	65	0.96	0	-1.04	-0.95	-0.71
	Баксан	Заюково	2100	140	6.67	34.2	1931-2007	77	2.5	-0.007	-0.01	0.09	0.04
Центральная Азия	Пяндж	Нижний Пяндж	113000	6893	6.10	1082.3	1932-2009	78	1.56	-0.001	1.49	1.84	1.42
	Вахш	Комсомолабад	29500	3629	12.30	619.4	1935-2010	76	1.88	-0.007	-0.45	2.08	0.43
	Зеравшан	Дупули	10200	558	5.47	161.2	1914-2009	96	2.35	-0.008	0.34	0.52	0.31
	Нарын	Нарын	10500	1250	11.90	91.2	1933-2008	76	1.85	-0.001	0.42	0.28	0.24
	Гунт	Хорог	13700	441	3.22	106.8	1940-2005	66	2.6	-0.009	-0.04	0.3	0.11
	Сох	Сарыканда	2480	241	9.72	44.1	1933-2009	77	3.43	-0.004	0.36	0.14	0.14
Северная Америка	Юкон	Пайлот Стейшн	831390	21557	2.59	6425.9	1957-2017	61	1.69	-0.001	5.25	7.95	16.03
		Игл	293265			2391.6	1951-2002	52	1.55	-0.003	4.58	6.63	6.09
	Маккензи	Арктик Ред	1680000	1593	0.09	9052.5	1943-2016	74	1.41	-0.003	5.63	26.97	14.04
		Норман Велс	1570000	1593	0.10	6784.5	1959-2000	42	1.4	-0.005	-8.64	21.57	7.87
	Лиард	форт Симпсон	464768	828	0.35	6787.6	1960-2000	41	1.39	-0.004	-7.92	19.66	7.81
Центральная Европа	Рона	Бокер	96359	790	0.82	1697.6	1920-2014	95	0.5	0	-2.7	-1.76	-0.27
		Порт-дю-Се	5089	715	14.05	180.2	1905-2019	115	1.12	-0.005	-1	0.15	0.003
	Инн	Шердинг	25665	406	1.58	737.6	1930-1984	55	0.87	-0.003	-0.02	0.01	-0.02
		Вассербург	11983			353.9	1827-1930	104	1.05	-0.001	-0.12	0.33	0.05

Условные обозначения. F_{bas} - площадь бассейна, F_{gl} - площадь оледенения до замыкающего гидроствора, $Q(1-12)$ – средний годовой расход воды в м³/сек, Ny - число лет наблюдений, δ - среднее значение параметра, $Q(7-9)$ и $Q(3-6)$ – соответственно, средние расходы в м³/сек за периоды июль-сентябрь и март-июнь.

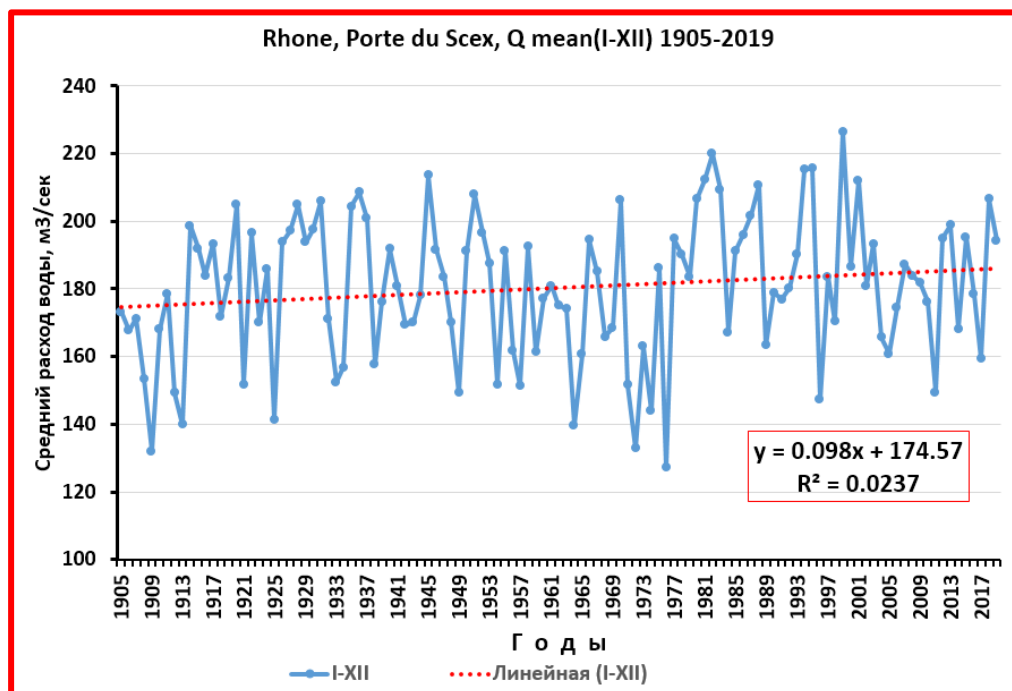
Бассейн р. Рона с объемом среднего многолетнего (1920-2014 гг.) годового стока $53,53 \text{ км}^3$ в устье входит в число наиболее водобильных речных бассейнов Центральной Европы. В верховье бассейна р. Рона выше гидропоста Порт-дю-Се (Porte du Scex) находится самое крупное современное региональное оледенение Центральной Европы размером $715,3 \text{ км}^2$ (определено автором по данным из [19]). Рис. 1 А-В Иллюстрирует многолетнее изменение параметра δ и средних расходов на гп Порт-дю-Се за периоды: III-VI, VII-IX, I-XII.



Б



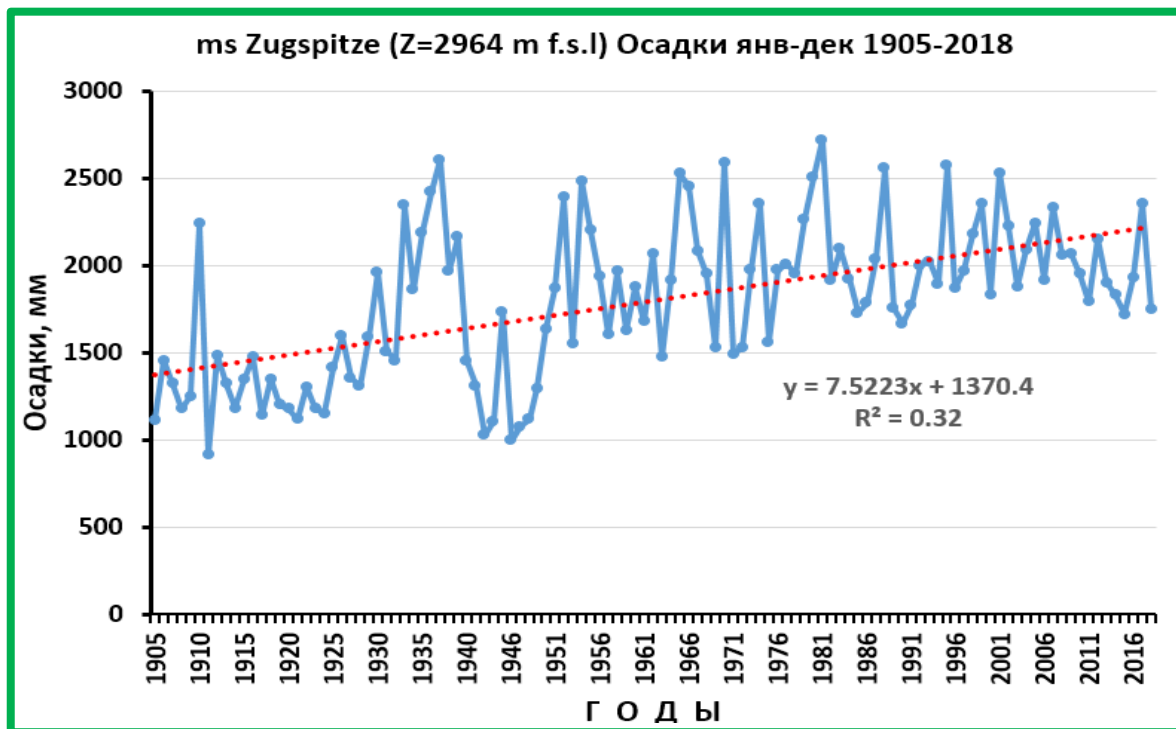
А



В

Очевидной общей причиной многолетней динамики параметра δ и средних расходов на гп Порт-дю-Се за периоды: III-VI, VII-IX, I-XII служат климатические факторы, изменение наиболее важных из них показано на рис. 2 А-Б. Оба этих рисунка характеризуют локальный линейный рост осадков и температуры воздуха, что в конечном счете обусловило увеличение годового стока р. Рона, несмотря на уменьшение ледникового питания в бассейне. Представленный пример указывает на недостаточность использования одного только параметра δ для объяснения колебаний стока в горно-ледниковом речном бассейне.

А



Б

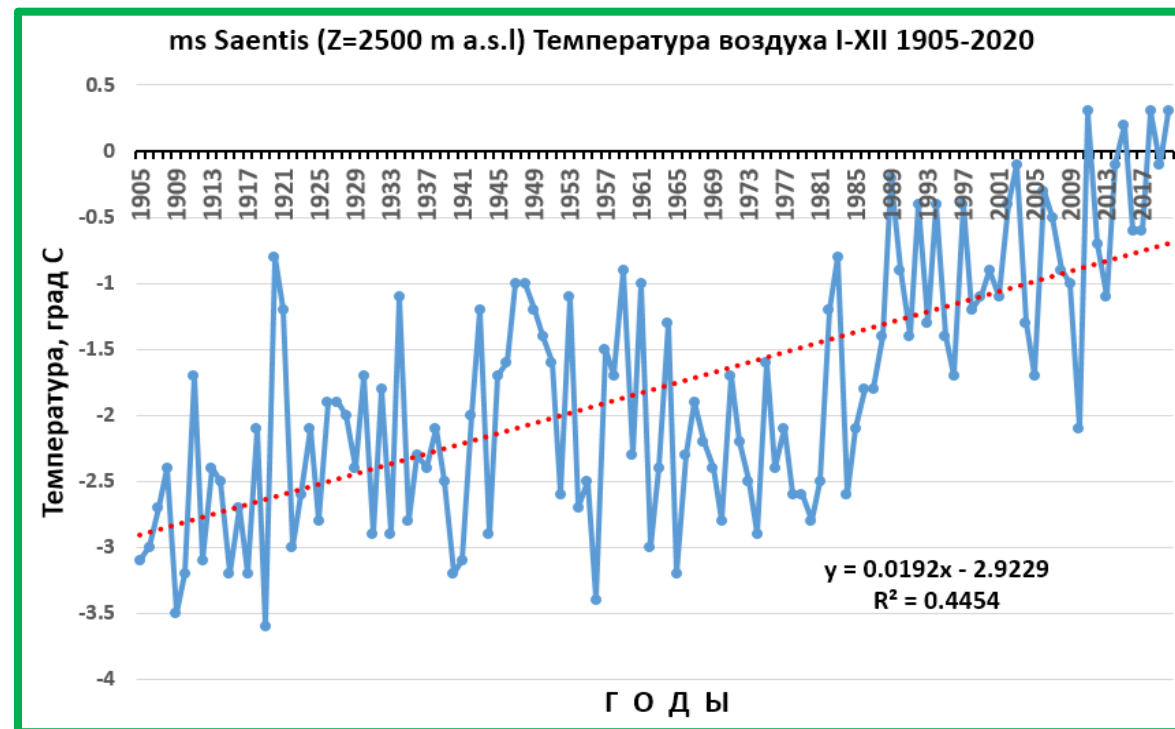


Рис. 2. Многолетнее изменение климатических факторов стока в верховье бассейна р. Рона.

А. Годовая сумма осадков на метеостанции Zugspitze, Z=2964 m a.s.l;

Б. Средняя годовая температура воздуха на метеостанции Saentis, Z=2500 m a.s.l.

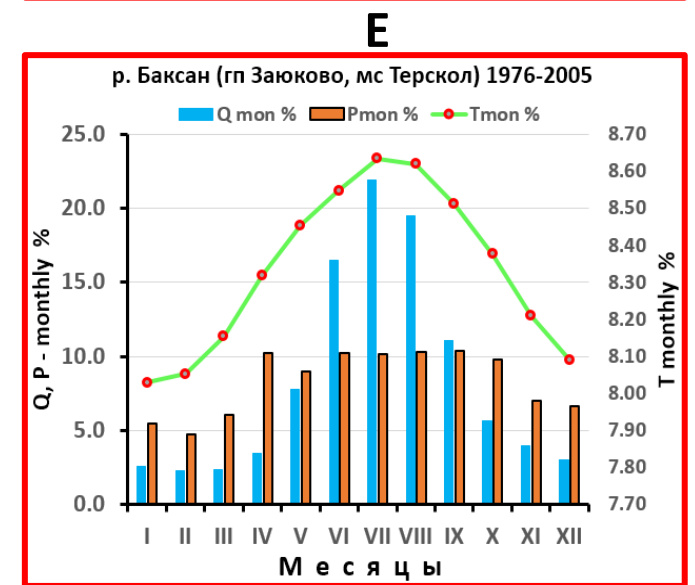
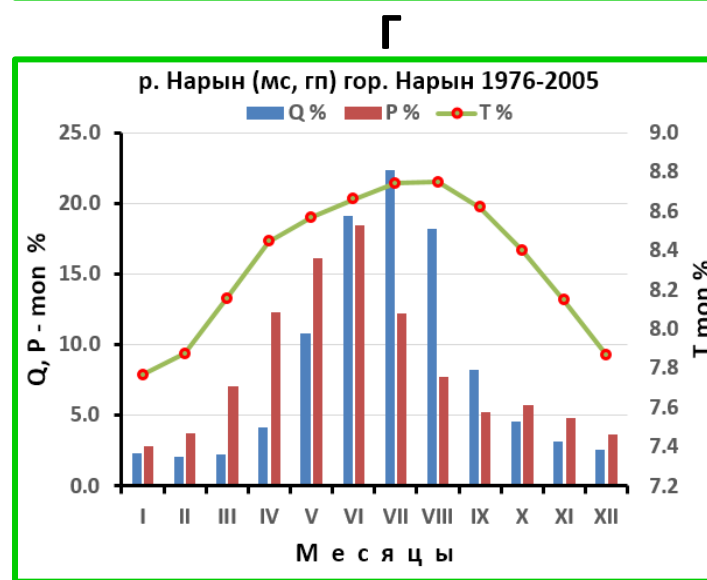
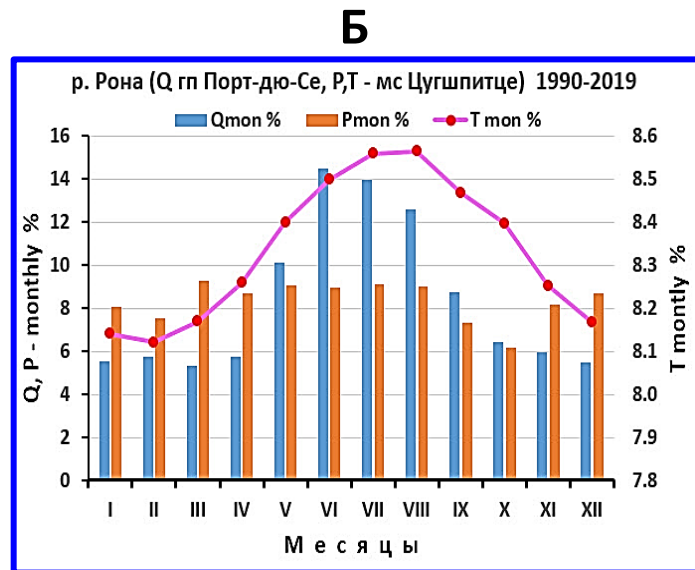
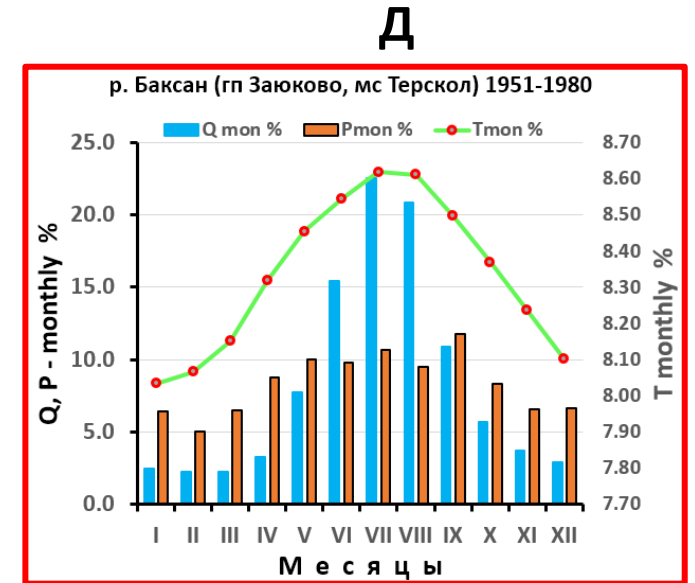
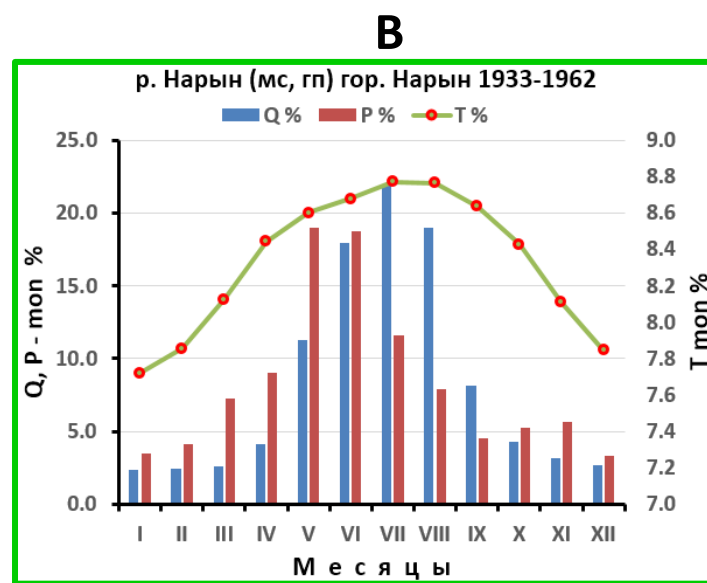
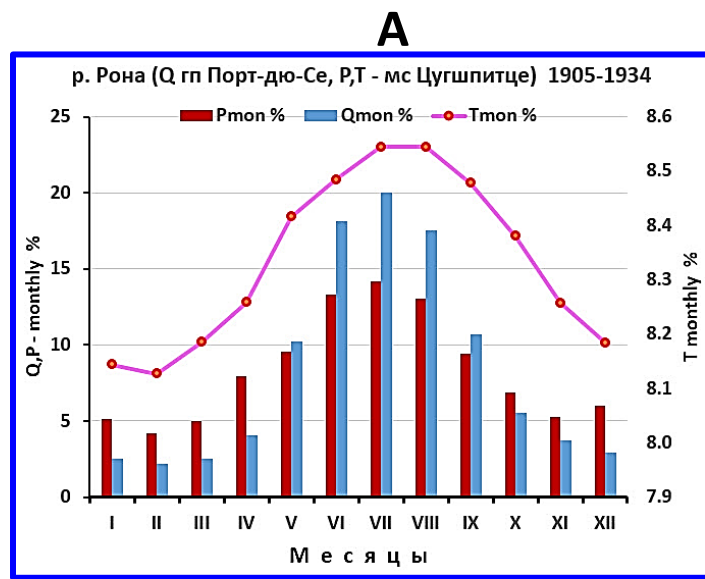


Рис. 3 Распределение в % месячных вкладов стока Qmon, осадков Pmon, температуры воздуха Tmon в их годовую сумму. А,Б – р. Рона (Европа), Б,В – р. Нарын (центр. Азия), Д,Е – р. Баксан (сев. Кавказ)

Приближенное определение ледникового питания V_{gl} . Основано на сведениях об изменении во времени морфометрических характеристик оледенения. При описании метода расчета ежегодных величин $V_{gl}(k)$ использованы данные об оледенении в бассейне р. Рона выше гидропоста Порт-дю-Се (см. табл. 1). Многолетнее изменение средних взвешенных высотно-площадных параметров ледников в верховье р. Рона иллюстрирует рис. 4. Предварительная аппроксимация $F_{gl}(k)$ в виде квадратичной формулы $F_{gl}(k) = f(k^2, k, \text{const})$ по данным [11, 12, 19] (см., рис. 4 а), показала нецелесообразность использования такой зависимости, поскольку нет оснований для роста F_{gl} с 1973 г. до 2003 г. Более обоснованным является применение метода линейной фильтрации для описания ежегодной динамики площади ледников F_{gl} в отдельных частях интервала 1973-2015 гг.

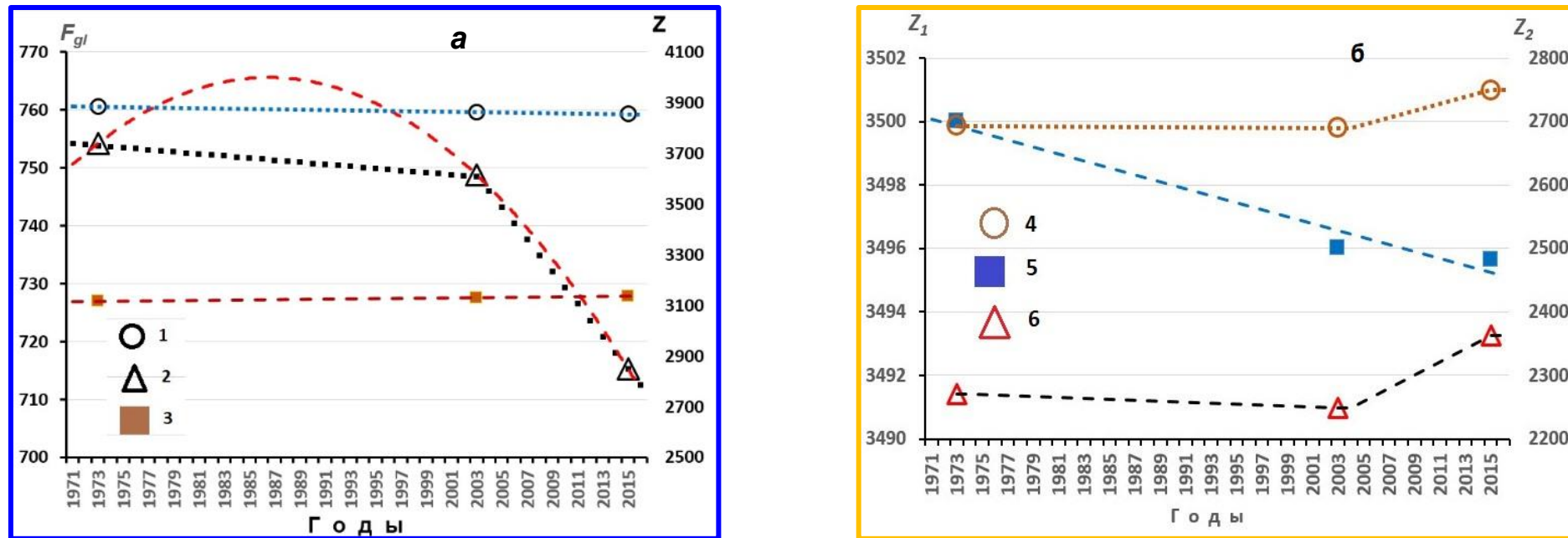


Рис. 4. Рассчитанное изменение параметров (штриховые линии) по подобранным уравнениям.

а. 1 – $Z_{max}(\text{beg})$, 2 – F_{gl} , 3 – Z_{mean} . Левая ось ординат – площадь F_{gl} в км², правая высоты Z в м н.у.м.

б. 4 – Z_{abl} , 5 – Z_{ac} , 6 – $Z_{min}(\text{end})$. Левая ось ординат Z_1 – относится к Z_{ac} , правая Z_2 – к Z_{abl} и Z_{min} . Z_1, Z_2 в м н.у.м.

Полученные по линейным уравнениям тренда, ежегодные значения F_{gl} , Z_{min} , Z_{abl} , Z_{max} , Z_{mean} , Z_{ac} для оледенения в верховье р. Рона в течение 1973-2015 гг. служат ключевой входной информацией для регионального расчета таких характеристик, зависящих от высоты Z , как Ab – удельная абляция льда, фирна и снега, осадки, температура и упругость водяного пара в воздухе. Распространенным [3-5,15] методом определения $Ab=Ab(Z)$ служат эмпирические уравнения $Ab=f(\vartheta)$, где $\vartheta=\vartheta(Z)$ – характерная средняя температура воздуха на высоте Z .

Удобной для региональных расчетов $Ab=f(\vartheta)$ является формула (1), предложенная А.Н. Кренке [5]:

$$Ab = 1,33(\theta_s + 9,66)^{2,85}, \quad (1)$$

где ϑ_s – средняя летняя температура воздуха в град. °С. По многолетним данным [10] метеорологических станций, расположенных на территории Швейцарии, для расчета $\vartheta_s=\vartheta_s(Z)$ получена эмпирическая формула:

$$\vartheta_s = -0,0059Z + 20,27, \quad (2)$$

где Z – высота в км н.у.м., коэффициент детерминации этой формулы $R^2 = 0,98$. Учитывая (1,2), для оценки в первом приближении объема V_{gl} в k -ом году с площади оледенения F_{gl} в верховье р. Рона, принято общее выражение:

$$V_{gl}(k) = Ab(Z_{mean}, k)F_{gl} \quad (3)$$

где Ab – годовой слой абляции на высоте Z_{mean} как функция ϑ_s . Поскольку $Z_{mean}=(Z_{min}+Z_{max})\cdot 0,5$, при применении формулы (3) получаем оценку V_{gl} , которая не учитывает внутригодовое и многолетнее изменение Ab в зависимости от типов поверхности ледника на площади F_{gl} , поэтому результат определение $V_{gl}(k)$ по формуле (3) является приближенным. Как показано в [3], в течение сезона абляции V_{gl} формируется на площади от одного до пяти типов поверхности ледника, следовательно, для определения ледникового питания следует применять более сложную модель, чем упрощенный расчет по формуле (3).

Расчет составляющих ледникового питания. Наиболее адекватно процесс формирования ледникового питания $V_{gl}(t)$ в течение сезона абляции на площади пяти типов поверхности отражает формула (4), в которой: S_{im} - лед под мореной, S_i - открытый лед, S_f - фирн возрастом более одного года («старый фирн»), S_{ws} - зимний снег, S_{ss} - летний снег. Следовательно, $F_{gl} = S_{im} + S_i + S_f + S_{ws} + S_{ss}$.

$$V_{gl}(t)_m = M(h_c)(\tilde{Z}_{im}, t)S_{im} + M(\tilde{Z}_i, t)S_i + M(\tilde{Z}_f, t)S_f + M(\tilde{Z}_{ws}, t)S_{ws} + M(\tilde{Z}_{ss}, t)S_{ss} \quad (4)$$

Здесь: $m=5$; M , $M(h_c)$ – соответственно, интенсивность таяния открытого льда и льда под мореной; $f(h_c)$ – безразмерная функция ослабления таяния льда под мореной толщиной h_c , имеющая в интервале $0 < h_c < 2$ см максимум и две характерные точки, в которых $f(h_c) = 1$; \tilde{Z} – средняя взвешенная высота в пределах соответствующего типа площади. Для расчета M применяются [3] эмпирические формулы: $M=f(\vartheta)$, либо $M=f(B_{sw}, \vartheta)$. Здесь ϑ – температура воздуха, B_{sw} – поглощенная коротковолновая солнечная радиация.

Для получения сведений о суммарных объемах таяния V_{gl} и ледникового стока W_{gl} в целом за абляционный период k -го года достаточно выполнить суммирование соответствующих слагаемых:

$$V_{gl}(k) = \sum_{d_{bp}}^{d_{ep}} [V_{im}(t) + V_i(t) + V_f(t) + V_{ws}(t) + V_{ss}(t)], \quad (5)$$

$$W_{gl}(k) = \sum_{d_{bi}}^{d_{ei}} [V_{im}(t) + V_i(t) + V_f(t)], \quad (6)$$

где d_{bp} и d_{ep} - даты начала и конца расчетного периода, d_{bi} и d_{ei} - даты начала и конца периода таяния льда.

Возможность применения формулы (4) для региональных расчетов W_{gl} и V_{gl} обусловлена наличием информации о многолетнем и внутригодовом ходе сезонной снеговой границы на ледниках $Z_{gl1} = Z_{ssb}(t)_k$ и максимальных значений в конце периода абляции $Z_{gl2} = Z_{ssb}[t(d_{ei})_k]$.

Расчет движения снеговой границы Z_{ssb} . Изменение $Z_{ssb}(t_k)$ происходит в зависимости от внутригодового хода аккумуляции и абляции в интервале дат d_{bi} и d_{ei} . Каждому из значений Z_{gl1} и Z_{gl2} соответствуют части F_{gl1} и F_{gl2} общей площади оледенения F_{gl} , при этом $F_{gl} - F_{gl2} = F_{ac}$. Метод расчета Z_{gl1} и Z_{gl2} подробно описан в работах [2-3, 17].

Основой этого метода служит, введенное в [3, 17], понятие об индексе баланса $I_B(k)$ аккумуляции и таяния в гляциальных областях, который представляет собой разность безразмерных аномалий сезонных осадков $I_p(k)$ и температуры воздуха $I_g(k)$. Тогда в каждом k -м году разность аномалий этих индикаторов приобретает смысл относительной оценки годового баланса отдельного ледника или их группы.

Все составляющие индекса баланса $I_B(k)$ определяются по данным репрезентативной метеорологической станции в речном бассейне. Критерием репрезентативности служит достаточно тесная зависимость между сезонным стоком в бассейне и компонентами индекса баланса.

В публикациях [2, 3, 17] показано, что связи между нормализованными значениями рядов $Z_{gl2n}(k)$ и индекса баланса $I_B(k)$ имеют высокие коэффициенты корреляции и обоснован способ перехода от статистической обеспеченности индекса баланса $Prob(I_B)$ в k -м году к максимальной высоте $Z_{gl2}(k)$ границы сезонного снега. При этом применяются следующие общие выражения:

$$I_B = \alpha\{[(P(k) - \bar{P})/\bar{P}] - \beta\{[\theta(k) - \bar{\theta}]/\bar{\theta}\}, \quad (7)$$

$$Z_{gl2}(k) = Z_{min} + \Delta Z \cdot Prob(I_B)(k), \quad (8)$$

$$\Delta Z = Z_{max}(k) - Z_{min}(k). \quad (9)$$

Здесь по данным метеорологических станций: $P(k)$ – сумма сезонных осадков, $\vartheta(k)$ – средняя сезонная температура воздуха, α и β – эмпирические коэффициенты, характеризующие значимость вклада P и ϑ в уравнение регрессии $I_b=f(P, \vartheta)$, \bar{P} и $\bar{\vartheta}$ – средние многолетние значения соответствующих переменных, $Prob(I_B)$ – находим по методу Алексеева [1] для значений $I_B(k)$, ранжированных в возрастающем порядке,

$$Prob(I_B)(k) = [m(Prob(I_B)(k) - 0,25)]/[N_{P,\vartheta} + 0,5], \quad (10)$$

где $m(Prob(I_B))$ – ранговые номера членов ряда $I_B(k)$, $N_{P,\vartheta}$ – число измерений составляющих индекса баланса.

Для расчета Z_{gl2} в течение 1971-2016 гг. на ледниках в верховье р. Рона были использованы измерения [10] осадков и температуры воздуха на репрезентативных метеостанциях Зоннблик (Sonnblick), Фрайденштадт (Freudenstadt) и формулы (7-10). Максимальная высота $Z_{gl2}(k)$ границы сезонного снега, рассчитанная по формуле (8), распространяется для определения V_{gl} и W_{gl} в k -м году на классифицированные группы ледников с групповыми параметрами Z_{max} и Z_{min} . Для определения высоты $Z_{gl1}(t)$ границы сезонного снега на дату d_{bi} применяется модель [3] движения снеговой границы во внеледниковой части речного бассейна.

Заключительный расчет ледникового питания W_{gl} выполнен по формуле (11), полученной в работе [3].

$$W_{gl} = W_{ifm} + \left(W_{ac} - W_{ifm}/3,5 \right). \quad (11)$$

В выражении (11) W_{ifm} – объем таяния открытого льда, льда под мореной и старого фирна в области абляции, рассчитанный по формуле (6), W_{ac} – объем таяния сезонного снега в области аккумуляции, равный:

$$W_{ac}(k) = Ab(\bar{Z}_{ac}, k)F_{ac} \quad (12)$$

В формуле (12) $\bar{Z}_{ac} = (Z_{beg} + Z_{gl2}) \cdot 0,5$; $F_{ac} = F_{gl} - F(Z_{gl2})$. Определение W_{ifm} выполняется с учетом осредненного влияния морены на таяние, а также многолетнего изменения максимальной высоты снеговой границы на ледниках, которое иллюстрирует рис. 5 а.

Независимые оценки качества расчетов ледникового питания. В общем случае достаточной и корректной оценкой качества полученного результата служит мера его отклонения от принятого эталона для той же характеристики. По объективным причинам пока не сформулированы понятия и значения эталонов для рассчитанных составляющих гидрологического режима как отдельного ледника, так и их совокупности. На практике каждый исследователь решает данную задачу по своему усмотрению, если вообще рассматривает в работе этот вопрос.

С целью получения абсолютных и относительных оценок качества рассчитанного объема W_{gl} в верховье р. Рона в среднем за 1971-2016 гг. использовано упрощенное уравнение годового водного баланса большого речного бассейне в виде:

$$R = (P - E + W_{gl}) + \Delta W \quad \text{в км}^3, \quad (13)$$

где R – сток, измеренный на гидропосту Порт-дю-Се, P – сумма жидких осадков и разности аккумуляции Ac_{snow} и абляции Ab_{snow} сезонного снега, W_{gl} – объем таяния многолетних запасов льда и фирна возрастом более одного года в области абляции вместе с объемом стока из области аккумуляции, E – испарение с деятельной поверхности водосбора, ΔW – динамические запасы воды в бассейне.

Объемы P , E на площади F_{bas} в уравнении (13) рассчитаны по формулам (14-17):

$$P = (0,543\tilde{Z} + 593,2) \cdot F_{bas}, \quad (14)$$

$$E = \{PE(\tilde{Z})th[P(\tilde{Z})/PE(\tilde{Z})]\} \cdot F_{bas}, \quad (15)$$

$$PE(\tilde{Z}) = 0,0018[(25 + T(\tilde{Z}))^2(100 - H_R)], \quad (16)$$

$$T(\tilde{Z}) = -0,0053\tilde{Z} + 11,62. \quad (17)$$

В (14-17): \tilde{Z} – средняя взвешенная высота бассейна в верховье р. Рона, PE – потенциальное испарение, th – гиперболический тангенс, T – температура воздуха, H_R – относительная влажность воздуха в %. Коэффициенты детерминации выражений $P=P(Z)$ и $T=T(Z)$ равны соответственно, 0,88 и 0,96. Формулы (15, 16) цитированы по работам [4, 22]. Б) Величина ΔW принята равной среднему объему стоку на гидропосту Порт-дю-Се за январь-март.

Составляющие уравнения (13) в среднем за 1971-2016 гг. и оценка качества расчета в целом для суммы компонентов правой части (13) приведены в табл. 3. В результате мониторинга [11, 19, 20] размеров оледенения в верховье р. Рона установлено сокращения площади оледенения с 980,6 км² в 1850 году до 715,3 км² в 2015 году, что в итоге привело к существенному изменению типа формирования стока по классификации В.Л. Шульца [6] от ледниково-снегового ($\delta \geq 1,0$) к снегово-ледниковому ($\delta < 1,0$), уменьшению объема W_{veg} и одновременному увеличению объема W_{year} . Изменение характеристик ледникового питания в верховье р. Рона в течение 1971-2016 гг. представлено на рис. 5.

Таблица 3. Составляющие годового водного баланса в верховье р. Рона в среднем за 1971-2016 гг.

Объем в км ³										%	
R	ΔW	P	E	W_{if}	W_{ifm}	W_{ac}	W_{gl}	R_c	V_{gl}	$\mu(R, R_c)$	χW_{gl}
5,920	0,961	5,482	1,088	0,784	0,613	0,387	0,825	6,180	1,001	4,4	13,9

Обозначения. $R_c = \Delta W + P + W_{gl} - E$ рассчитанный сток р. Рона (гп Порт-дю-Се), $\mu(R, R_c) = (R_c - R) / R \cdot 100$ – отклонение рассчитанного стока от измеренного R , χW_{gl} – средний многолетний вклад ледникового питания в сток р. Рона (гп Порт-дю-Се). В табл. 3 включен также, для сравнения, результат расчета V_{gl} по формуле (3).

Очевидно, что представленное в табл. 3 значение $\mu(R, R_c)$ можно отнести к W_{gl} , равно как и к P и E , при условии, что остальные компоненты правой части (13) определены без ошибок. В рамках поставленной проблемы наиболее трудноразрешимой задачей является установление и обоснование эталона для суммы осадков в целом для речных бассейнов с расчлененной орографией. Ближе всего к эталонным значениям объема испарения находится независимый результат расчета E по формулам (15, 16), поскольку в работе [22] было показано, что уравнение (16) обеспечивает наилучшую сходимость с данными испарителя. Дополнительной оценкой качества рассчитанного объема W_{gl} служит обратно пропорциональная связь $R = f(W_{gl})$ в верховье р. Рона, которая имеет типичный характер для рек ледниково-снегового типа питания.

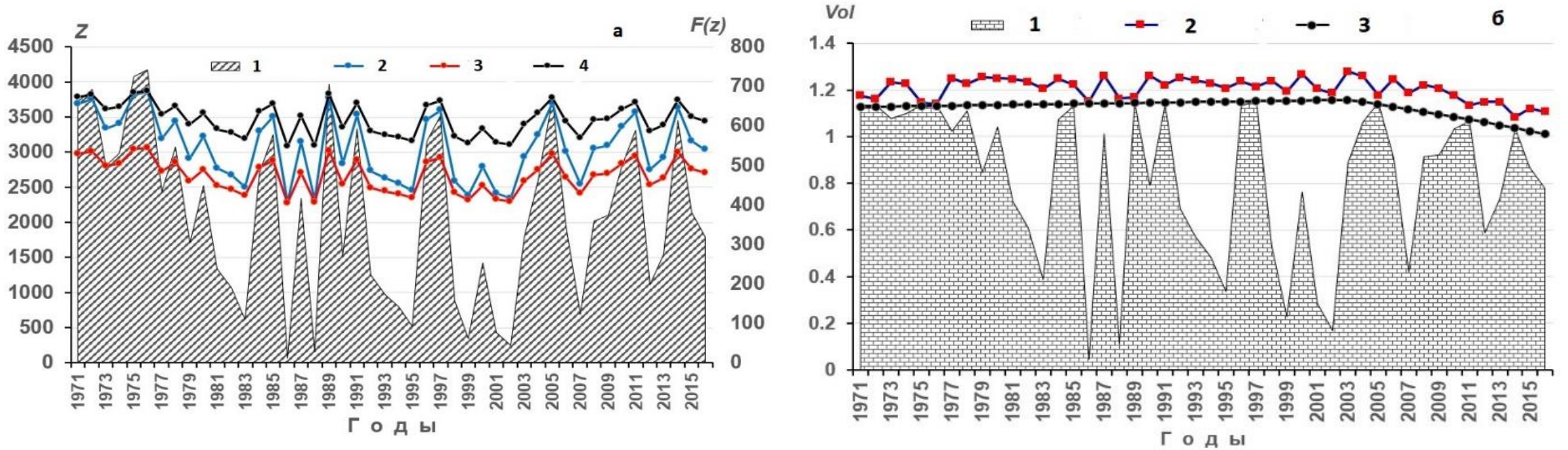


Рис. 5. Изменение характеристик ледникового питания в верховье р. Рона, 1971-2016 гг.

а. 1 – площадь ледников $F_{gl2}(t)$ (km^2) как функция максимальной высоты $Z_{gl2}(t)$ границы сезонного снега, 2 – максимальная высота $Z_{gl2}(t)$ границы сезонного снега, 3 - 4 средние высоты (в м н.у.м.), соответственно, в интервалах: $\Delta z_1 = (Z_{end} + Z_{gl2}) \cdot 0,5$ и $\Delta z_2 = (Z_{beg} + Z_{gl2}) \cdot 0,5$. Левая ось ординат Z относится к высотам, правая $F(Z)$ к площади оледенения. Все высоты в м н.у.м.

б. 1 – объем ледникового питания Vol (km^3) как функция площади ледников $F_{gl2}(t)$, абляции льда и старого фирна в интервале Δz_1 , 2 – объем ледникового питания (km^3) на площади $F_{gl1}(t)$ как функция абляции льда, старого фирна и сезонного снега в интервале $\Delta Z = Z_{max} - Z_{min}$, 3 – объем ледникового питания (km^3) на площади $F_{gl1}(t)$ как функция абляции в интервале ΔZ без выделения типов тающей поверхности ледников и без учета изменения максимальной высоты $Z_{gl2}(t)$ границы сезонного снега. Абляции рассчитана по формуле Кренке.

Заключение

- 1. Выполнен анализ различных вариантов численного описания многолетних колебаний ледникового питания рек. В результате установлено: а) предложенный в работе [Шульц, 1965] индекс δ , равный отношению объемов W /расходов воды Q за июль-сентябрь и март-июнь не учитывает в явном виде влияние на сток изменения размеров оледенения в речном бассейне; б) исследование и вывод об изменении во времени T индекса δ должно быть основано на оценке градиента линейных уравнений $\delta=f(T)$, $Q(7-9)=f(T)$, $Q(3-6)=f(T)$, $Q(\text{год})=f(T)$, а также $P(\text{год})=f(T)$ и $\theta(\text{год})=f(T)$ по данным репрезентативной метеостанции; в) результаты линейной экстраполяции пространственно-временных изменений высотно-площадных характеристик классифицированных совокупностей ледников в речных бассейнах являются входной информацией для расчета ежегодных объемов ледникового питания; г) адекватное описание процесса формирования внутригодового и многолетнего ледникового питания должно учитывать различия в абляции, зависящие от типов деятельной поверхности ледника и их высотно-площадных характеристик.**
- 2. Содержащийся в открытых Каталогах [11-14, 19, 20-21] комплекс высотно-площадных характеристик состояния оледенения Швейцарии в течение 1973-2015 гг. характеризует минимально необходимую информационную основу для исследования и описания региональных составляющих гидрологического процесса средствами геоинформационных систем. Эти каталоги, несмотря на нерегулярность их обновления, являются единственным источником исходных данных для расчетов гидрологического режима оледенения в речных бассейнах Центральной Европы.**

Выражаю большую благодарность организациям: Франции (EauFrance), и Швейцарии (Federal Office for the Environment FOEN. Hydrological Data Service for watercourses and lakes; Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss) за информационную поддержку выполненной работы.

Финансовая поддержка исследования получена из бюджета Института географии РАН при выполнении научных тем № 0148-2018-0008 и № 0148-2019-0004.

Список литературы

1. Алексеев Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. Ленинград: Гидрометеиздат, 1971. 359 с.
2. Коновалов В.Г. Каталогизация горных ледников и генерализация их распределения по материалам дистанционного зондирования. Москва: ИКИ РАН, 2010. Т.7. №2. с. 43-54.
3. Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л: Гидрометеиздат, 1985. 237 с.
4. Коновалов В.Г., Пиманкина Н.В. Пространственно-временное изменение составляющих водного баланса на северном склоне Заилийского Алатау // Лёд и Снег. 2016. 56(4). P. 453-471. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-453-471>
5. Кренке А.Н. Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: – Гидрометеиздат, 1982. – 287 с.
6. Шульц В.Л. Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат. 1965. 691 с.
7. Bodo V.A. Monthly Discharge Data for World Rivers (excluding former Soviet Union). Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds552.0/>
8. EauFrance. www.hydro.eaufrance.fr
9. Federal Office for the Environment FOEN. Hydrological Data Service for watercourses and lakes. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/water>
10. Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss. Monthly and annual reports.
11. Fischer M., Huss M., Barboux C., and Hoelzle M. The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers // Arctic, Antarctic, and Alpine Research, Vol. 46, No. 4, 2014, pp. 933–945.
12. Fluctuations of Glaciers Database. World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. DOI: 10.5904/wgms-fog-2017-10.
13. GLIMS glaciers Data Base. <http://glims.colorado.edu/glacierdata/>
14. Herreid, S., Pellicciotti, F. The state of rock debris covering Earth's glaciers // Nature Geosci. 2020. 13. 621–627. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0615-0>.
15. Hock R. DEBAM and DETIM. Manual. 1999. <https://github.com/regine/meltmodel.git>
16. Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussailant I., Brun F. and Käab A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century // Nature 2021. Vol 592. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
17. Konovalov V.G. Snow line and formation of glacier-derived runoff in glacier basins. In 34 selected papers on main ideas of the Soviet Glaciology, 1940s-1980s. Initiated, Compiled and Edited by V.M. Kotlyakov. Moscow, 1997. P. 402-410.
18. Linsbauer A., Huss M., Hodel E., Bauder A., Fischer M., Weidmann Y., and Bärtschi H. The new Swiss Glacier Inventory SGI2016: a detailed cartographic representation of Swiss glacier extent and supraglacial debris-cover // EGU21-5873
19. Paul F., Rastner P., Azzoni R., Diolaiuti G., Fugazza D., Le Bris R., Nemec J., Rabatel A., Ramusovic M., Schwaizer G., and Smiraglia C. Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2 // Earth Syst. Sci. Data, 12, 1805–1821, 2020. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020>
20. RGI Consortium. 2017. A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0.
21. Scherler, D., Wulf, H., Gorelick, N. Global assessment of supraglacial debris-cover extents. // Geophysical Research Letters. 2018. 45. 11. 798–11. <https://doi.org/10.1029/2018GL080158>
22. 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. pp. 429-442.