

## Динамика оледенения и ледникового стока в Швейцарских Альпах

Коновалов В. Г., доктор географических наук, вед. науч. сотр.  
 Институт географии Российской Академии Наук, Москва

**Аннотация.** На примере крупнейшего оледенения Швейцарии и Центральной Европы описаны методы моделирования и представлены результаты расчета за 1971-2016 гг. основных составляющих водного баланса (осадки, испарение, ледниковое питание, динамические запасы воды) в горно-ледниковом речном бассейне. Работа включает разделы: Введение, Оценки ледникового питания в верховье р. Рона, Независимые оценки качества расчетов ледникового питания.

**Ключевые слова.** Оледенение, ледниковый сток, Швейцарские Альпы, водный баланс.

DOI: 10.5281/zenodo.5497551

### Введение.

Бассейн р. Рона с объемом среднего многолетнего (1920-2014 гг.) годового стока  $W_{year} = 53,53 \text{ км}^3$ , измеренного [8] на гидропосту Бокер (Beausaire), входит в число наиболее водообильных речных бассейнов Центральной Европы: Дунай ( $W_{year} = 202,31 \text{ км}^3$  за 1921-2002 гг.), Рейн ( $W_{year} = 71,20 \text{ км}^3$  за 1814-2004 гг.) данные [7]. 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 в проекте ArcGis по данным из [19]). Результаты исследования ледников этого региона с разной степенью детальности приведены в публикациях [11-14, 16, 18-20] и др. Описание некоторых свойств и режима оледенения Европы содержится в многочисленных публикациях применительно либо к орографическим районам (Австрийские, Швейцарские, Французские, Итальянские Альпы), либо к основным речным бассейнам: Рона, Рейн, Дунай, По. Наиболее полная морфометрическая информация о ледниках в бассейне р. Роны (верховье), пригодная для гидрологических расчетов и полученная по данным 1960-1961, 1964-1965, 1976-1978, 1971-1973 годов, находится в Каталоге [12] и привязана к 1973 году, охватывающем 96,6% всей гляциологической информации в [12]. Изменение площади оледенения Швейцарии и бассейна р. Рона (верховье) по данным [11, 12, 18-20, 21] и полученным в проекте ArcGis характеризует табл. 1.

Таблица 1. Параметры оледенения Швейцарии и верховья бассейна р. Рона

	Источники информации				
	WGI [12]	RGI v.6 [20]	RGI v.6 [11]	Sentinel-2 [19]	SGI 2016 [18]
Год	1973	2003	2010	2015	2016
$F_{gl} (1)$	1341,7	1143,2	1091,6*	985,8	961
$F_{gl} (2)$	754,2	808; 761,7*	748,8*	715,3	
$F_{mor}/F_{gl} \%$	9,2	15,7 [14, 21]		16,3 [14, 21]	11,0

Обозначения. WGI – World Glacier Inventory; RGI – Randolph Glacier Inventory; SGI – Switzerland Glacier Inventory. Sentinel-2 – Каталог ледников Альп по результатам обработки изображений со спутника Sentinel-2. Сведения в строке «Год» охватывают несколько лет.  $F_{gl} (1)$ ,  $F_{gl} (2)$  – Соответственно, площадь в  $\text{км}^2$  оледенения Швейцарии и верховья р. Рона. \* – Данные получены в проекте ArcGis;  $F_{mor}/F_{gl}$  – относительная площадь морены на ледниках в верховье р. Рона.

Многолетнее изменение средних взвешенных морфометрических параметров ледников в верховье р. Рона классифицированных в группы площадь-азимут представлено на рис. 1.

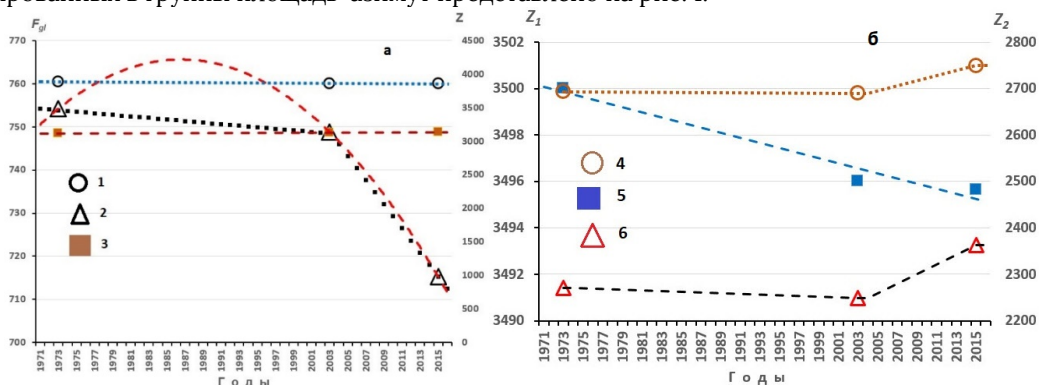


Рис. 1

Изменение площади и высотных характеристик ледников в верховье р. Рона по данным каталогов [11, 12, 19]. Штриховые линии иллюстрируют рассчитанное изменение параметров по подобранным уравнениям.

а. 1 –  $Z_{max}(beg)$ , 2 –  $F_{gl}$ , 3 –  $Z_{mean}$ . Левая ось ординат – площадь  $F_{gl}$  в км<sup>2</sup>, правая высоты  $Z$  в м н.у.м.

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

Предварительная аппроксимация изменения  $F_{gl}$  в виде квадратичной формулы  $F_{gl} = f(x^2, x, const)$  по данным [11, 12, 19] (см., рис.1 а), показала нецелесообразность использования такой зависимости поскольку нет оснований для роста  $F_{gl}$  с 1973 г. до 2003 г. По мнению автора, более обоснованным является применение метода линейной фильтрации для описания ежегодной динамики площади ледников  $F_{gl}$  в отдельных частях интервала 1973–2015 гг. Из рисунка 1 а–б следует, что кроме  $F_{gl}$  линейная фильтрация оказалась эффективной для описания ежегодного тренда величин  $Z_{min}$ ,  $Z_{abl}$  в то время как по нефитрованным данным обычное линейное уравнение вполне адекватно (коэффициент детерминации  $\approx 1$ ) характеризует годовые изменения  $Z_{max}$ ,  $Z_{mean}$ ,  $Z_{ac}$  за весь интервал 1973–2015 гг.

#### Оценки ледникового питания в верховье р. Рона

**Использование отношения  $\delta = W(VII-IX)/W(III-VI)$ .** Изменения средних многолетних объемов речного стока за календарный год  $W_{year}$ , вегетационный период (апрель–сентябрь)  $W_{veg}$  и отношения  $\delta$  в течение 1905–2054 гг., приведены в табл. 2. Здесь  $W(VII-IX)$  и  $W(III-VI)$  – соответственно объемы стока р. Рона (верховье) за июль–сентябрь и март–июнь на гидрологическом посту (гп) Порт-дю-Се (Porte du Scex). В табл. 2 величины переменных  $\delta$ ,  $W_{veg}$ ,  $W_{year}$  в 1905–2019 гг. установлены в результате обработки измерений стока [9] на гп Порт-дю-Се. Значения  $\delta$ ,  $W_{veg}$ ,  $W_{year}$  за 2020–2054 гг. определены путем применения соответствующих уравнений тренда, полученных в 1905–2019 гг.

В результате мониторинга [11, 19, 20] размеров оледенения в верховье р. Рона установлено сокращения площади оледенения с 980,6 км<sup>2</sup> в 1850 году до 715,3 км<sup>2</sup> 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  $W_{year}$ .

Таблица 2. Средние значения  $\delta$  и стока р. Рона в 1905–2054 гг.

Переменная	Интервалы лет				
	1905–34	1935–64	1965–94	1995–2024	2025–2054
$\delta$	1,44	1,34	1,08	0,97	0,80
$W_{veg}$ , км <sup>3</sup>	4,488	4,400	3,862	3,793	3,498
$W_{year}$ , км <sup>3</sup>	5,553	5,665	5,757	5,809	5,932

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 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  $Ab=f(\theta)$ , где  $\theta=\theta(Z)$  – характерная средняя температура воздуха на высоте  $Z$ . Удобной для региональных расчетов  $Ab=f(\theta)$  является формула (5), предложенная А.Н. Кренке [5]:

$$Ab = 1,33(\theta_s + 9,66)^{2,85}, \quad (5)$$

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

$$\theta_s = -0,0059Z + 20,27, \quad (6)$$

где  $Z$  – высота в км н.у.м., коэффициент детерминации этой формулы  $R^2 = 0,98$ .

Учитывая (5, 6), для оценки в первом приближении объема  $V_{gl}$  в момент  $t$  с площади оледенения  $F_{gl}$  в верховье р. Рона, принято общее выражение:

$$V_{gl}(t) = Ab(Z_{mean}, t)F_{gl} \quad (7)$$

где  $Ab$  – слой абляции на высоте  $Z_{mean}$  как функция  $\theta_s$ . Поскольку  $Z_{mean}=(Z_{min}+Z_{max})\cdot 0,5$ , при применении формулы (7) происходит использование  $Ab(Z_{mean})$  для расчета  $V_{gl}$  со всей площади  $F_{gl}$  деятельной поверхности ледников, которая вынужденно считается однотипной и однородной, хотя на самом деле, как показано в [3], в течение сезона абляции  $V_{gl}$  формируется на площади пяти типов поверхности: лед под мореной  $S_{im}$ , открытый лед  $S_i$ , фирн возрастом более одного года («старый фирн»)  $S_f$ , зимний снег  $S_{ws}$ , летний снег  $S_{ss}$ , то есть  $F_{gl} = S_{im} + S_i + S_f + S_{ws} + S_{ss}$  и этот процесс отражает более точная формула (8):

$$V_M(t)_m = M(h_c)(\bar{Z}_{im}, t)S_{im} + M(\bar{Z}_i, t)S_i + M(\bar{Z}_f, t)S_f + M(\bar{Z}_{ws}, t)S_{ws} + M(\bar{Z}_{ss}, t)S_{ss} \quad (8)$$

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  $f(h_c) = 1$ ;  $\bar{Z}$  – средняя взвешенная высота в пределах соответствующего типа площади.

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

$$V_{gl} = \sum_{d_{bp}}^{d_{ep}} V_M(t)_m \quad (9)$$

$$W_{gl} = \sum_{d_{bi}}^{d_{ei}} [V_{im}(t) + V_i(t) + V_f(t)] \quad (10)$$

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 (8) для массовых расчетов  $W_{gl}$  и  $V_{gl}$  обусловлена наличием информации о внутригодовом ходе сезонной снеговой границы на ледниках  $Z_{gl2}=Z_{ssb}(t_i)$  и максимальных значений в конце периода абляции  $Z_{gl2}=Z_{ssb}[t(d_{ei})]$ . Изменение  $Z_{ssb}(t_i)$  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  $I_B(t)$  аккумуляции и таяния в гляциальных областях, который представляет собой разность безразмерных аномалий сезонных осадков  $I_P(t)$  и температуры воздуха  $I_\theta(t)$ . Физический смысл понятия об индексе баланса состоит в том, что безразмерные аномалии  $I_P(t)$  и  $I_\theta(t)$  рассматриваются как индикаторы соответственно аккумуляции и абляции в гляциальных областях. Тогда в каждом году разность аномалий этих индикаторов приобретает смысл относительной оценки годового баланса отдельного ледника или их группы.

Все составляющие индекса баланса  $I_B(t)$  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  $Z_{gl2n}(t)$  и индекса баланса  $I_B(t)$  имеют высокие коэффициенты корреляции и обоснован способ перехода от статистической обеспеченности индекса баланса  $Prob(I_B)$  в  $t$ -м году к максимальной высоте  $Z_{gl2}(t)$  границы сезонного снега. При этом применяются следующие общие выражения:

$$I_B = \alpha\{(P(t) - \bar{P})/\bar{P}\} - \beta\{[\theta(t) - \bar{\theta}]/\bar{\theta}\}, \quad (11)$$

$$Z_{gl2}(t) = Z_{min} + \Delta Z \cdot Prob(I_B)(t), \quad (12)$$

$$\Delta Z = Z_{max}(t) - Z_{min}(t). \quad (13)$$

Здесь по данным метеорологических станций:  $P(t)$  - сумма сезонных осадков,  $\theta(t)$  - средняя сезонная температура воздуха,  $\alpha$  и  $\beta$  - эмпирические коэффициенты, характеризующие значимость вклада  $P$  и  $\theta$  в уравнение регрессии  $I_B=f(P, \theta)$ ,  $\bar{P}$  и  $\bar{\theta}$  - средние многолетние значения соответствующих переменных,  $Prob(I_B)$  - находим по методу Алексева [1] для значений  $I_B(t)$ , ранжированных в возрастающем порядке,

$$Prob(I_B)(t) = [m(Prob(I_B)(t) - 0,25)/[N_{P,\theta} + 0,5], \quad (14)$$

где  $m(Prob(I_B))$  - ранговые номера членов ряда  $I_B(t)$ ,  $Z_{max}$ ,  $Z_{min}$  - определены в конкретном речном бассейне по данным региональных каталогов горного оледенения,  $N_{P,\theta}$  - число измерений составляющих индекса баланса.

Для расчета  $Z_{gl2}$  в течение 1971-2016 гг. на ледниках в верховье р. Рона были использованы измерения осадков и температуры воздуха на репрезентативных метеостанциях Зоннблик (Sonnblick), Фрайденштадт (Freudenstadt) и формулы (11-14).

**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 косвенных 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 бассейна в виде:

$$R = (P - E + W_{gl}) + \Delta W \quad \text{в км}^3, \quad (15)$$

где  $R$  - сток, измеренный на гидропосту Порт-дю-Се,  $P$  - сумма жидких осадков и разности аккумуляции  $A_{c_{snow}}$  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,  $\Delta W$  - динамические запасы воды в бассейне. В соответствии с уравнением (15) годовые объемы испарения и осадков относятся ко всей площади речного бассейна  $F_{bas}$ , включая площадь оледенения  $F_{gl}$ . Предполагается, что величины всех переменных в уравнении (15) должны быть установлены в один и тот же момент или интервал времени. Численные значения переменных в правой части (15) получены следующими способами. А) Объемы  $P$ ,  $E$  на площади  $F_{bas}$  в уравнении (15) рассчитаны по формулам (16-19):

$$P = (0,543\bar{Z} + 593,2) \cdot F_{bas}, \quad (16)$$

$$E = \{PE(\bar{Z})th[P(\bar{Z})/PE(\bar{Z})]\} \cdot F_{bas}, \quad (17)$$

$$PE(\bar{Z}) = 0,0018[(25 + T(\bar{Z}))^2(100 - H_R)], \quad (18)$$

$$T(\bar{Z}) = -0,0053\bar{Z} + 11,62. \quad (19)$$

В (16-19):  $\bar{Z}$  - 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  $P=P(\bar{Z})$  и  $T=T(\bar{Z})$  равны соответственно, 0,88 и 0,96. Формулы (17, 18) цитированы по работам [4, 22]. Б) Величина  $\Delta W$  принята равной среднему объему стоку на гидропосту Порт-дю-Се за январь-март. В) Для расчета ледникового питания  $W_{gl}$  использованы уравнения (5-19) и (20):

$$W_{gl} = W_{ifm} + \left( W_{ac} - \frac{W_{ifm}}{3,5} \right). \quad (20)$$

В (20)  $W_{ifm}$  - объем таяния открытого льда, льда под мореной и старого фирна в области абляции,  $W_{ac}$  - объем таяния сезонного снега в области аккумуляции. Определение  $W_{ifm}$  и  $W_{ac}$  выполняется по формулам (5-

19, 20) с учетом осредненного влияния морены на таяние (см. табл. 1), а также многолетнего изменения максимальной высоты снеговой границы на ледниках, которое иллюстрирует рис. 2а. Выражение (20) получено в работе [3]. Составляющие уравнения (15) в среднем за 1971–2016 гг. и оценка качества расчета в целом для суммы компонентов правой части (15) приведены в табл. 3. Изменение характеристик ледникового питания в верховье р. Рона в течение 1971–2016 гг. представлено на рис. 2.

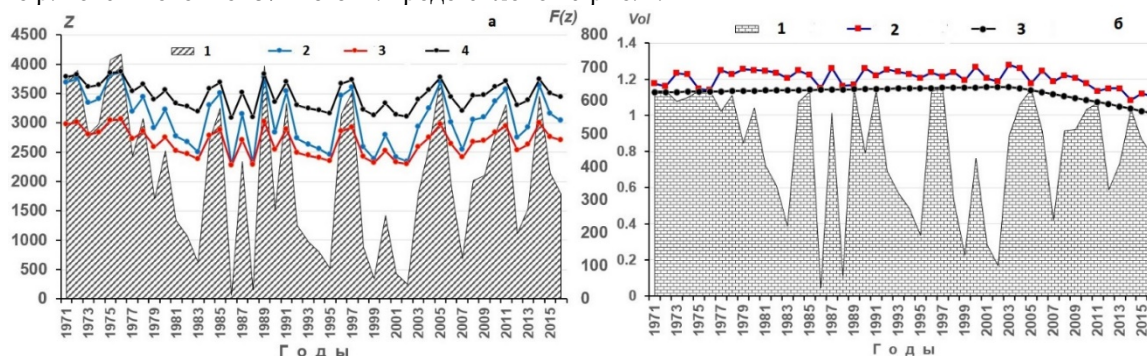


Рис. 2

Изменение характеристик ледникового питания в верховье р. Рона, 1971–2016 гг. а. 1 – площадь ледников  $F_{gl2}(t)$  (км<sup>2</sup>) 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  $Vol$  (км<sup>3</sup>) как функция площади ледников  $F_{gl2}(t)$ , абляции льда и старого фирна в интервале  $\Delta z_1$ , 2 – объем ледникового питания (км<sup>3</sup>) 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 (км<sup>3</sup>) на площади  $F_{gl}(t)$  как функция абляции в интервале  $\Delta Z$  без выделения типов тающей поверхности ледников и без учета изменения максимальной высоты  $Z_{gl2}(t)$  границы сезонного снега.

Таблица 3. Составляющие годового водного баланса в верховье р. Рона

Объем в км <sup>3</sup>										%	
R	$\Delta W$	P	E	$W_{if}$	$W_{ifm}$	$W_{ac}$	$W_{gl}$	$R_c$	$V_{gl}$	$\mu(R, R_c)$	$\chi W_{gl}$
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. Расшифровка символов R,  $\Delta W$ , P, E,  $W_{if}$ ,  $W_{ifm}$ ,  $W_{ac}$ ,  $W_{gl}$ , была дана ранее в тексте раздела **Независимые оценки качества расчетов ледникового питания**,  $R_c = \Delta W + P + W_{gl} - E$  рассчитанный сток р. Рона (гп Порт-дю-Се),  $\mu(R, R_c) = (R_c - R) / R \cdot 100$  – отклонение рассчитанного стока от измеренного R,  $\chi W_{gl}$  – средний многолетний вклад ледникового питания в сток р. Рона (гп Порт-дю-Се).

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 (15) 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 (17, 18), поскольку в работе [22] было показано, что уравнение (18) обеспечивает наилучшую сходимости 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. В табл. 3 включен также, для сравнения, результат расчета  $V_{gl}$  по формуле (7).

**Заключение**

Содержащийся в открытых Каталогах [11–14, 19, 20–21] комплекс высотно-площадных характеристик состояния оледенения Швейцарии в течение 1973–2015 гг. представляет собой 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.

Принципиально важно, что держатели [8–10] детальной климатической и гидрологической информации предоставляют исследователям свободный и дружественный доступ к первичным результатам сетевых наблюдений. Обе эти уникальные в мировом масштабе возможности служат залогом дальнейшего повышения научно-информационного уровня результатов и выводов региональных гляциологических исследований.

Пользуясь случаем, выражаю 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) большую благодарность за информационную поддержку выполненной работы.

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

### Литература:

1. Алексеев Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. Ленинград: Гидрометеоздат, 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: Гидрометеоздат, 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). Р. 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.: – Гидрометеоздат, 1982. – 287 с.
6. Шульц В.Л. Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеоздат. 1965. 691 с.
7. Bodo B.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](http://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 Kääb 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., Nemeč 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.