

РАСЧЁТ И ПРОГНОЗ ЛЕДНИКОВОГО ПИТАНИЯ В РЕЧНЫХ БАССЕЙНАХ

© 2023 г. В. Г. Коновалов^{1,*}

¹ Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: vladgeo@gmail.com

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

После доработки 26.01.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2023 г.

Впервые разработан и проверен метод регионального предсказания с месячной заблаговременностью годовой абляции Ab на высоте фирновой границы $Z_{fg} = Z_{mean}$ как функции прогнозируемой средней летней температуры воздуха T_s . Для определения T_s в начале мая установлены региональные зависимости T_s от температуры воздуха апреля T_4 . Разработан метод прогноза годового и вегетационного стока р. Рона (Швейцария, Альпы) на 2025–2054 гг.

Ключевые слова: ледниковый сток, Евразия, Северная Америка, Центральная Европа, Центральная Азия, региональный расчёт, абляция, заблаговременность прогноза

DOI: 10.31857/S2076673423020102, EDN: RUYAEL

ВВЕДЕНИЕ

Параметризация физических процессов в форме эмпирических одно- и многофакторных линейных уравнений регрессии широко применяется в гидрологических и климатических расчетах. Применение этого метода в гляциологии затруднено отсутствием многолетних данных о режиме оледенения. Работа направлена на решение двух важных проблем гидрологии ледников: 1) разработку метода параметризации и расчёта ежегодных изменений ледникового стока в крупных речных бассейнах Северного полушария на основе: получения и применения линейных зависимостей от времени региональных морфологических характеристик – площади оледенения F_{gl} , высоты начала ледников Z_{beg} , их конца Z_{end} и средней высоты $Z_{mean} = (Z_{beg} + Z_{end}) \times 0.5$; моделирование влияния внутригодовых и многолетних изменений на ледниках высоты линии равновесия аккумуляции и абляции (далее – ELA, equilibrium line altitude) на состав типов тающей поверхности ледников и объем ледникового питания; применение приближённого расчёта удельной годовой абляции как функции средней летней температуры воздуха; 2) разработку прогноза ледникового питания с заблаговременностью один месяц для ежегодных величин и не менее одного года для средних многолетних.

Информационной основой для гидрологических и гляциологических расчётов служили многолетние измерения стока (Bodo; EauFrance; Fed-

eral Office for the Environment FOEN) на гидропостах в бассейнов рек Евразии (Катунь, Баксан), Северной Америки (Юкон, Маккензи, Лиард), Центральной Европы (Рона, Инн), Центральной Азии (Пяндж, Вахш, Зеравшан, Нарын, Гунт, Сох); данные мониторинга параметров оледенения в бассейне р. Рона за 1971–2016 гг. (Fischer et al., 2014; Fluctuations of Glaciers Database, 2017; Paul et al, 2020); многолетние измерения осадков и температуры воздуха на метеорологических станциях, расположенных на территории Швейцарии (Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss), Памира и Тянь-Шаня (Williams, Kononov, 2008).

Реконструкция высотно-площадных характеристик оледенения с годичным разрешением временных рядов F_{gl} , Z_{end} , Z_{beg} , Z_{mean} выполняется по ограниченному данным регионального мониторинга оледенения. Приведён пример численного описания и анализа ежегодной реконструированной динамики параметров оледенения в верховье р. Рона (гидропост Порт-дю-Се) на основе исходных данных, опубликованных в (Fluctuations of Glaciers Database, 2017; RGI Consortium, 2017; Paul et al., 2020). Многолетнее региональное изменение в 1971–2015 гг. величины F_{gl} и взвешенных по площади параметров ледников: Z_{end} , Z_{beg} , Z_{mean} , $Z_{abl} = (Z_{end} + Z_{mean}) \times 0.5$ – высота области абляции, $Z_{ac} = (Z_{mean} + Z_{beg}) \times 0.5$ – высота области аккумуляции иллюстрирует рис. 1.

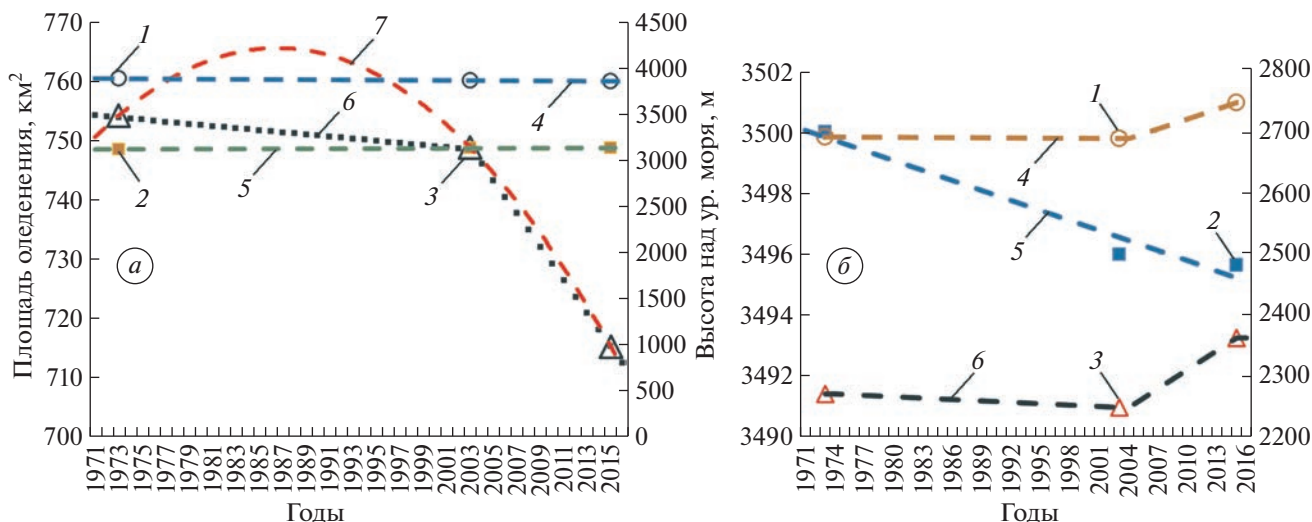


Рис. 1. Изменение параметров оледенения в верховье р. Рона в 1971–2015 гг.
 а: измеренные параметры оледенения 1 – Z_{beg} ; 2 – Z_{mean} ; 3 – F_{gl} в 1971, 2003, 2015 г.; 4–6 – линейная фильтрация Z_{beg} , Z_{mean} , F_{gl} ; 7 – квадратичная аппроксимация параметра F_{gl} .
 б: параметры оледенения 1 – Z_{abl} ; 2 – Z_{ac} ; 3 – Z_{end} в 1971, 2003, 2015 г.; 4–6 – линейная фильтрация Z_{abl} , Z_{ac} , Z_{end} . Левая ось ординат – относится к Z_{ac} , правая – к Z_{abl} и Z_{end} .
Fig. 1. Change of glaciation parameters in the upper Rhone River during 1971–2015.
 а: measured parameters of glaciation 1 – Z_{beg} ; 2 – Z_{mean} ; 3 – F_{gl} in 1971, 2003, 2015; 4–6 – linear filtration of Z_{beg} , Z_{mean} , F_{gl} ; 7 – quadratic approximation of the F_{gl} parameter.
 б: parameters of glaciation 4 – Z_{abl} ; 5 – Z_{ac} ; 6 – Z_{end} in 1971, 2003, 2015; 4–6 – linear filtration of Z_{abl} , Z_{ac} , Z_{end} . The left axis of the ordinate refers to Z_{ac} , the right – to Z_{abl} and Z_{end} .

Предварительная аппроксимация $F_{\text{gl}}(k)$ в виде квадратичной формулы $F_{\text{gl}}(k) = f(k^2, k, \text{const})$ показала *нецелесообразность* применения такой зависимости, поскольку нет климатических оснований для роста F_{gl} с 1973 до 2003 г. Здесь и далее k – порядковый номер года в эмпирической выборке. В данном случае более обосновано применение метода линейной фильтрации для описания ежегодной динамики площади ледников F_{gl} и Z_{end} , Z_{beg} , Z_{mean} в отдельных частях интервала 1973–2015 гг.

Аналогичные графики и результаты реконструкции ежегодных значений F_{gl} , Z_{end} , Z_{abl} , Z_{beg} , Z_{mean} , Z_{ac} получены после обработки ограниченных данных мониторинга состояния ледников в бассейнах притоков р. Терек (Северный Кавказ) и р. Западная Кызылсу (Памир). Эти результаты служат ключевой входной информацией для регионального расчёта таких характеристик, зависящих от высоты Z , как удельная абляция/таяние льда, фирна и снега; осадки, температура воздуха и упругость водяного пара в воздухе.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА АБЛЯЦИИ

Как показано в работе (Коновалов, 2021), годовой объём W_{gl1} таяния на площади оледенения F_{gl} в первом приближении можно принять рав-

ным произведению F_{gl} и годового слоя абляции $Ab(Z_{\text{mean}})$ на средней высоте ледников $Z_{\text{mean}} = (Z_{\text{end}} + Z_{\text{beg}}) \times 0.5$:

$$W_{\text{gl1}} = Ab(Z_{\text{mean}}) F_{\text{gl}}, \tag{1}$$

где Ab – годовой слой абляции (таяния) в мм на высоте Z_{mean} как функция характерной температуры воздуха $T = T(Z)$ на высоте Z_{mean} . Здесь Z_{end} , Z_{beg} – соответственно высоты конца и начала распределения $F_{\text{gl}} = F_{\text{gl}}(Z)$. Необходимо также выполнение условия линейного изменения $Ab = Ab(Z)$ и постоянства учета временных колебаний параметров Z_{end} , Z_{beg} .

Распространенным (Кренке, Ходаков, 1966; Кренке, 1982; Коновалов, 1985; Носк, 1999; Коновалов, Пиманкина, 2016; Вилесов, 2016; Коновалов, 2021) методом определения слоя $Ab = Ab(Z)$ служат эмпирические уравнения $Ab = f(T)$. В частности, по данным о температуре воздуха и абляции в 11 районах наблюдений, 10 из которых расположены в Северном полушарии, а один в Антарктиде, в работе (Кренке, Ходаков, 1966) была получена условно “глобальная” зависимость годовой абляции от средней летней температуры воздуха $Ab = f(T_s)^3$. В этой работе (Кренке, Ходаков, 1966) и более поздних публикациях (Вилесов и др., 1980; Вилесов, 2016) установлено пространственное изменение эмпирических коэффициентов в формуле $Ab = f(T_s)^3$.

Таблица 1. Региональные характеристики средней температуры воздуха T_4 и T_s

Регион		Швейцария	Австрия	Памир	Северный Кавказ	Тянь-Шань
Годы		1971–2016	1971–2016	1966–2005	1946–2005	1960–1992
N_{mst} *		19	9	20	6	18
Z_{mst} , м (интервал) **		273–3580	280–3105	329–4169	702–2927	760–3639
Z_{mst} , м (среднее)		941	938	2244	1645	1868
Long, east***		6.13°–10.98°	9.61°–5.91°	67.61°–73.91°	41.73°–46.25°	69.52°–78.48°
Lat, north		46.00°–48.45°	46.83°–48.62°	36.73°–39.73°	42.37°–43.73°	39.83°–42.85°
Υ град °С км ⁻¹ ****		–6.44...–6.18	–6.10...–5.85	–6.44...–5.96	–5.23...–5.22	–7.50...–6.64
T_4 °С *****	$T(Z_{mst})$	6.4	5.8	6.7	4.8	6.3
	S	0.71	1.82	2.00	1.97	0.39
	S/σ	0.13	0.32	0.30	0.46	0.32
T_s °С	$T(Z_{mst})$	15.5	15.1	17.3	14.1	16.3
	S	0.81	1.31	2.12	1.20	0.18
	S/σ	0.16	0.24	0.31	0.30	0.24

* N_{mst} – число метеостанций; ** Z – высота над ур. моря; ***Long и Lat – географические координаты (долгота и широта); **** Υ град °С км⁻¹ – вертикальный градиент температуры воздуха в регионе; Для всех переменных, где значения разделены знаком тире, слева от тире приведены минимальные величины, а справа – максимальные; ***** $T_4(Z)$, $T_s(Z)$ – соответственно, однофакторные зависимости температуры воздуха апреля и июня–августа от высоты местности Z ; S – среднеквадратичная ошибка расчета T ; S/σ – критерий качества расчётной формулы.

Для приближенных региональных расчетов годовой абляции $Ab = f(T)$ использована формула (2), предложенная в работе (Кренке, 1982):

$$Ab = 1.33(T_s + 9.66)^{2.85}, \quad (2)$$

где Ab – удельная абляция (таяние + испарение) в мм, T_s – средняя летняя температура воздуха за июнь–август в °С на высоте Z_{mean} . Ввиду крайне незначительного вклада слоя испарения в величине Ab , формула (2) наиболее пригодна для определения слоя таяния M поверхности ледника. Поэтому в качестве оценок M на ледниках Северного полушария будем принимать во внимание результаты расчёта по формуле (2).

Изменение вертикального профиля $T_s(Z)$ в результате известного явления “скачка температуры воздуха” μT_s при переходе с грунтовой поверхности на ледниковую учтено в бассейнах рек Западная Кызылсу (Памир) и Рона (Альпы) по региональной эмпирической формуле (3), полученной в работе (Ходаков, 1978):

$$\log \mu T_s = 0.28F_{gl} - 0.07. \quad (3)$$

Результаты определения $W_{gl}(k)$ по формулам (1–3) носят приближенный характер, так как не учитывают изменение типов деятельной поверхности на площади F_{gl} (лёд под мореной, открытый лёд, фирн, зимний и летний снег) в течение принятого интервала времени. Кроме того, остается открытым вопрос радикального учета простран-

ственных изменений эмпирических параметров в формуле (2).

Прогнозы ледникового питания. Научная основа метода – расчёт и прогноз временного ряда температуры воздуха $T_s(Z_{mean})$, которая служит аргументом для определения слоя абляции на площади оледенения F_{gl} . По исходным данным, перечисленным в табл. 1, получены ежегодные вертикальные профили температуры воздуха $T_4 = T_4(Z)$, $T_s = T_s(Z)$ и формулы для расчета T_s как функции T_4 с коэффициентом детерминации более 0.90. Таким образом, в региональном масштабе впервые установлено, что температура воздуха апреля T_4 обеспечивает с месячной заблаговременностью прогноз T_s и соответственно прогноз слоя годовой абляции на высоте Z_{mean} . При этом региональный расчёт $T_4(Z_{mean})$ и $T_s(Z_{mean})$ в k -е годы выполняется по формуле (4):

$$T(Z_{mean}) = -\alpha_0(k)Z_{mean}(k) + \beta_0(k), \quad (4)$$

где Z – высота над ур. моря, α_0 , β_0 – эмпирические параметры, которые имеют многолетний ход и определяются отдельно для профилей $T_4 = T_4(Z)$ и $T_s = T_s(Z)$.

Основополагающее значение для прогноза $Ab = f(T_s)$ с месячной заблаговременностью имеет вертикальный профиль средней месячной температуры воздуха $T_4 = T_4(z, t)$, который получаем по данным метеорологических станций в начале

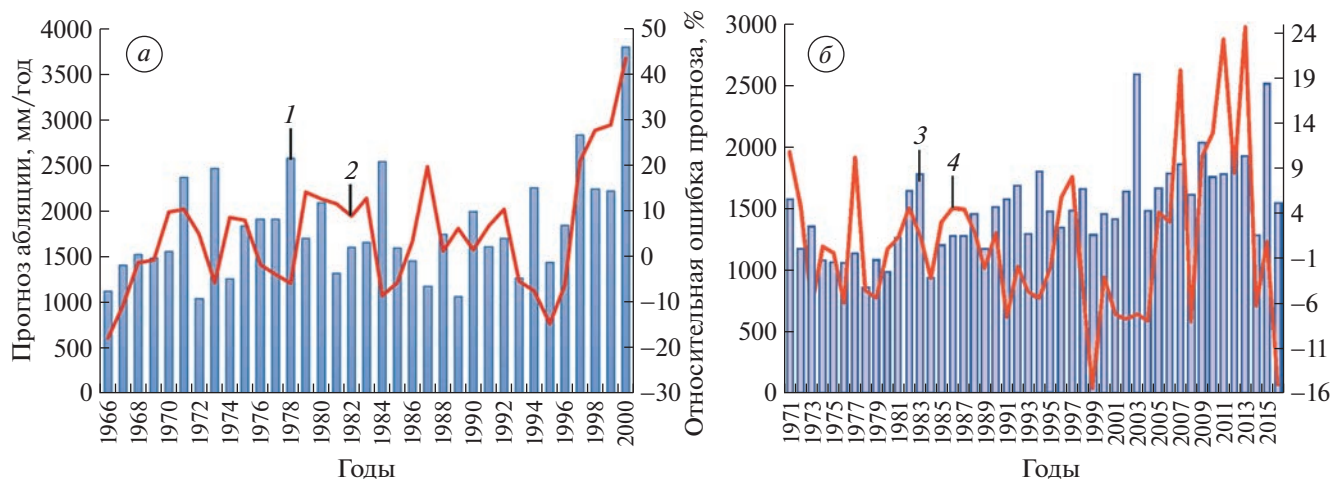


Рис. 2. Прогноз удельной абляции $Ab(t)$ мм/год на высоте $Z_{\text{mean}} = Z_{fg}$ и относительная разность между $Ab(Z_{fg})$ и $Ab^*(Z_{fg})$ в %. *a:* 1 и 2 – в бассейне р. Западная Кызылсу; *б:* 3 и 4 – в бассейне р. Рона.

Fig. 2. Forecast of specific ablation $Ab(t)$ mm/year at an altitude of $Z_{\text{mean}} = Z_{fg}$ and the relative difference between $Ab(Z_{fg})$ and $Ab^*(Z_{fg})$ in %. *a:* 1 and 2 – in the basin of the Western Kyzylsu river; *б:* 3 and 4 – in the basin of the Rhone River.

мая, и впервые найденные региональные зависимости $T_s = f(T_4, t)$. Установлено, что для решения задачи прогноза многолетний ход эмпирических параметров в линейных формулах $T_s = f(T_4, t)$ следует аппроксимировать с помощью метода и компьютерной программы “Гусеница” (Голяндина, 2004). В итоге прогноз годовой абляции на высотах $Z_{fg}(t)$ в конкретном речном бассейне выполняется по выражениям $T_{s^*} = f(T_4, t)$, $Ab^* = f(T_{s^*})$ и $F_{gl} = F_{gl}(t)$. Средняя относительная ошибка расчета $Ab = f(T_s)$ по зависимостям $T_s = T_s(z, t)$ в бассейнах рек Роны и Кызылсу составила, соответственно, 1.6 (6.7%) и 5.0 (10.5%), в скобках приведены относительные ошибки прогноза в этих же бассейнах. Прогнозные значения $Ab^* = f(T_{s^*}, t + 1)$ считаем действительными до сентября текущего года. После этого во временных рядах $Ab = f(T_s, t)$ и $T_s = f(T_4, t)$ результаты расчета и прогнозные значения параметров заменяются фактическими. И так далее до следующего случая прогноза $Ab^* = f(T_{s^*})$.

Многолетнее изменение прогнозируемых величин $Ab^*(Z_{fg})$ и ошибки прогнозов относительно $Ab(Z_{fg})$, в качестве иллюстрации решения поставленной проблемы, представлены на рис. 2. Экстремальное значение $Ab(Z_{fg})$ гидрологического режима оледенения в бассейне р. Рона в 2003 г. (см. рис. 2, б) подтверждается (Klimawandel in der Schweiz, 2020), общим для Швейцарии за 1960–2016 гг. максимумом температуры воздуха и отрицательными значениями баланса массы оледенения в 2003 г. вследствие аномального таяния на пяти справочных альпийских ледниках (Fluctuations of Glaciers Database, 2017). Дополнительные

характеристики к результатам прогноза $Ab(Z_{fg})$ содержатся в табл. 2.

Исследование и прогноз индекса ледникового питания. Региональное исследование пространственно-временных колебаний индекса ледникового питания δ , предложенного в работе (Шульц, 1965), выполнено автором по многолетним ежегодным измерениям стока в бассейнах рек Евразии, Северной Америки, Центральной Европы и Центральной Азии. Индекс δ равен отношению между объемами стока W либо средними расходами воды Q за периоды июль–сентябрь (Q_{7-9}) и март–июнь (Q_{3-6}). Считается, что объем W_{7-9} обусловлен преобладанием ледникового питания реки, а объем W_{3-6} – снегового. Результаты расчетов индекса δ приведены в табл. 2, где учтены данные (Bodo; Fluctuations of Glaciers Database, 2017; RGI Consortium, 2017; Paul et al., 2020).

В итоге анализа зависимости $\delta = \delta(t)$ установлены важные региональные выводы относительно динамики и последствий изменения составляющих речного стока. Так, градиент уравнения линейного тренда для индекса δ во всех рассмотренных речных бассейнах имеет отрицательное значение, что указывает на сокращение ледниково-снегового питания, точнее – только его ледниковой составляющей. Несмотря на это, годовой сток уменьшился только в трёх бассейнах, а в остальных наблюдалось увеличение годового стока Q_{year} , вследствие роста Q_{3-6} , который перекрывал уменьшение Q_{7-9} .

Изменение в течение 1905–2054 гг. средних многолетних объемов речного стока р. Рона за календарный год W_{year} , вегетационный период (апрель–сентябрь) W_{veg} и отношения δ иллюстриру-

Таблица 2. Региональные характеристики оледенения и стока в речных бассейнах

Река	F_b^*	F_{gl}/F_b^{**}	Q_{year}^{***}	Годы наблюдений	N_k^{****}	Градиент линейного тренда $y = f(t)^{*****}$				
						δ_{mn}	δ_{gr}	Q_{7-9}	Q_{3-6}	Q_{year}
<i>Северная Евразия</i>										
Катунь	58400	0.90	611.6	1936–2000	65	0.96	0.0	–1.04	–0.95	–0.71
Баксан	2100	6.67	34.2	1931–2007	77	2.50	–0.007	–0.01	0.09	0.04
<i>Центральная Азия</i>										
Пяндж	113000	6.10	1082.3	1932–2009	78	1.56	–0.001	1.49	1.84	1.42
Вахш	29500	12.30	619.4	1935–2010	76	1.88	–0.007	–0.45	2.08	0.43
Зеравшан	10200	5.47	161.2	1914–2009	96	2.35	–0.008	0.34	0.52	0.31
Нарын	10500	11.90	91.2	1933–2008	76	1.85	–0.001	0.42	0.28	0.24
Гунт	13700	3.22	106.8	1940–2005	66	2.60	–0.009	–0.04	0.30	0.11
Сох	2480	9.72	44.1	1933–2009	77	3.43	–0.004	0.36	0.14	0.14
<i>Северная Америка</i>										
Юкон	831390	2.59	6425.9	1957–2017	61	1.69	–0.001	5.25	7.95	16.03
	293265		2391.6	1951–2002	52	1.55	–0.003	4.58	6.63	6.09
Маккензи	1680000	0.09	9052.5	1943–2016	74	1.41	–0.003	5.63	26.97	14.04
	1570000	0.10	6784.5	1959–2000	42	1.40	–0.005	–8.64	21.57	7.87
Лиард	222000	0.35	1910.7	1960–2000	41	1.39	–0.004	–7.92	19.66	7.81
<i>Центральная Европа</i>										
Рона	96359	0.82	1697.6	1920–2014	95	0.50	0.0	–2.70	–1.76	–0.27
	5089	14.05	180.2	1905–2019	115	1.12	–0.005	–1.00	0.15	0.003
Инн	25665	1.58	737.6	1930–1984	55	0.87	–0.003	–0.02	0.01	–0.02
	11983		353.9	1827–1930	104	1.05	–0.001	–0.12	0.33	0.05

* F_b – площадь бассейна, км²; ** F_{gl}/F_b – относительная площадь оледенения F_{gl} , %; *** Q_{year} – средний годовой расход воды, м³/сек; **** N_k – число лет наблюдений; ***** δ_{mn} – среднее значение параметра δ ; δ_{gr} – градиент уравнения линейного тренда $\delta = \delta(t)$; Q_{7-9} и Q_{3-6} – соответственно, средние многолетние расходы в м³/сек за периоды июль–сентябрь и март–июнь.

Таблица 3. Средние значения δ и составляющих стока р. Рона в 1905–2054 гг.

Переменная	Интервалы лет				
	1905–1934	1935–1964	1965–1994	1995–2024	2025–2054
δ	1.44	1.34	1.08	0.97	0.80
W_{veg} , км ³	4.488	4.400	3.862	3.793	3.498
W_{year} , км ³	5.553	5.665	5.757	5.809	5.932

ют данные табл. 3. Ожидаемые величины δ , W_{veg} , W_{year} для 2025–2054 гг. рассчитаны по линейным уравнениям $\delta = \delta(t)$, $R^2 = 0.96$; $W_{veg} = f(\delta)$, $R^2 = 0.98$; $W_{year} = f(\delta)$, $R^2 = 0.94$, полученным за 1905–2024 гг. Значения δ в 2020–2024 гг. получены путём экстраполяции по уравнению $\delta = \delta(t)$, найденного для интервала 1995–2019 гг. Здесь и далее R^2 – коэффициент детерминации. Таким образом, индекс δ для верховья р. Рона оказался не только репрезентативной характеристикой изменения составляющих стока реки W_{veg} , W_{year} , но и

вполне пригодным аргументом для долгосрочного прогноза этих переменных.

Составляющие ледникового питания в речных бассейнах. Далее изложен способ уточнения объёма ледникового питания W_{gl} на основе формулы (1), при условии сохранения метода расчета $Ab = f(T_s)$ и прогноза $Ab^* = f(T_{s*})$ путём использования региональных эмпирических зависимостей $T_s = f(T_4)$, параметры которых приведены в табл. 1. В этой ситуации идёт речь об определении сумм составляющих гидрологического режима оледе-

нения W_{gl} и V_{gl} , которые в общем виде описывают формулы (5–6):

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

$$W_{gl}(k) = \sum_{d_{begi}}^{d_{endi}} [V_{im}(t_1) + V_i(t_1) + V_f(t_1)], \quad (6)$$

где V_{im} , V_i , V_f , V_{ws} , V_{ss} , соответственно, объёмы таяния льда под мореной, открытого льда, старого фирна, зимнего и летнего снега; d_{begr} и d_{endr} – даты начала и конца расчётного периода, d_{begi} и d_{endi} – даты начала и конца периода таяния льда, $\tau = d_{begr} \dots d_{endr}$, $t_1 = d_{begi} \dots d_{endi}$.

Возможность применения формул (5–6) для региональных расчетов V_{gl} и W_{gl} обусловлена наличием информации о многолетнем $k = 1 \dots N$ и внутригодовом $t = d_{begi} \dots d_{endi}$ ходе ELA на ледниках $ELA_1 = ELA_1(t_k)$ и максимальных значений ELA в конце периода абляции льда, т.е. $ELA_2 = ELA_1(d_{endi})$.

Моделирование и расчёт ELA . Изменение ELA_1 происходит в зависимости от внутригодового и многолетнего хода аккумуляции и абляции в интервале дат d_{begi} и d_{endi} . Каждому значению ELA_1 соответствует часть F_{gl1} общей площади оледенения F_{gl} , при этом $F_{gl} - F_{gl1} = F_{ac}$. Метод расчёта ELA_1 подробно описан в работах (Коновалов, 1985; Konovalov, 1997). Исследование в разных условиях (Коновалов, 1985) локальных связей годовых значений абляции и составляющих годового баланса массы с ELA_2 на ледниках выявило высокую тесноту таких зависимостей. Этот результат позволяет рассчитать многолетние ряды объёмов W_{gl1} , V_{gl} на площади F_{gl} в интервалах $Z_{beg} - Z_{end}$ и $ELA_2 - Z_{end}$, $Z_{beg} - ELA_2$ как функции ELA_2 . Основой метода расчета ELA_2 служит введенное в (Konovalov, 1997; Коновалов, 1985) 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 $I_T(k)$. Физический смысл понятия об индексе баланса состоит в том, что безразмерные аномалии $I_p(k)$ и $I_T(k)$ 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 $I_B(k)$ определяются по данным репрезентативной метеорологической станции в речном бассейне. Критерием репрезентативности служит достаточ-

но тесная зависимость между сезонным стоком в бассейне и компонентами индекса баланса.

В публикациях (Коновалов, 1985; Konovalov, 1997) показано, что связи между нормализованными значениями рядов $ELA_{2n}(k)$ 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 $ELA_2(k)$. При этом применяются следующие общие выражения:

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

$$ELA_2(k) = Z_{end} + \Delta Z \text{Prob}(I_B)(k), \quad (8)$$

$$\Delta Z = Z_{beg}(k) - Z_{end}(k). \quad (9)$$

Здесь по данным метеорологических станций: $P(k)$ – сумма сезонных осадков; $T(k)$ – средняя сезонная температура воздуха; α и β – эмпирические коэффициенты, характеризующие значимость вклада P и T в уравнение регрессии $I_B = f(P, T)$, рассчитаны по методу Алексеева (Алексеев, 1971); \bar{P} и \bar{T} – средние многолетние значения соответствующих переменных; $Prob(I_B)$ – находим по методу Алексеева (Алексеев, 1971) для значений $I_B(k)$, ранжированных в возрастающем порядке,

$$\text{Prob}(I_B)(k) = [n(\text{Prob}(I_B)(k) - 0.25) / (N_{p,T} + 0.5)], \quad (10)$$

где n ($Prob(I_B)$) – ранговые номера членов ряда $I_B(t)$, Z_{beg} , Z_{end} – определены в конкретном речном бассейне по данным региональных каталогов горного оледенения, $N_{p,T}$ – число измерений составляющих индекса баланса. Размерность $Prob(I_B)$ в формуле (10) – доли единицы.

Для расчета $ELA_2(k)$ в течение 1971–2016 гг. на ледниках в верховье р. Рона были применены многолетние измерения осадков и температуры воздуха (Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss) на репрезентативных метеостанциях Зоннблик (Sonnblick), Фрайденштадт (Freudenstadt) и формулы (7–10). Подробное описание методов определения d_{begi} , d_{endi} и результаты расчёта содержатся в работе (Коновалов, 1985).

Влияние учета составляющих W_{gl} при расчёте годовой абляции по формуле (6) и на многолетнюю динамику параметров гидрологического режима оледенения W_{gl1} и V_{gl} в бассейне р. Рона иллюстрирует рис. 3. Видно, что результат определения объёма ледникового питания и его репрезентативность при анализе водных ресурсов горно-ледникового речного бассейна зависит от типизации поверхности ледников для расчёта абляции.

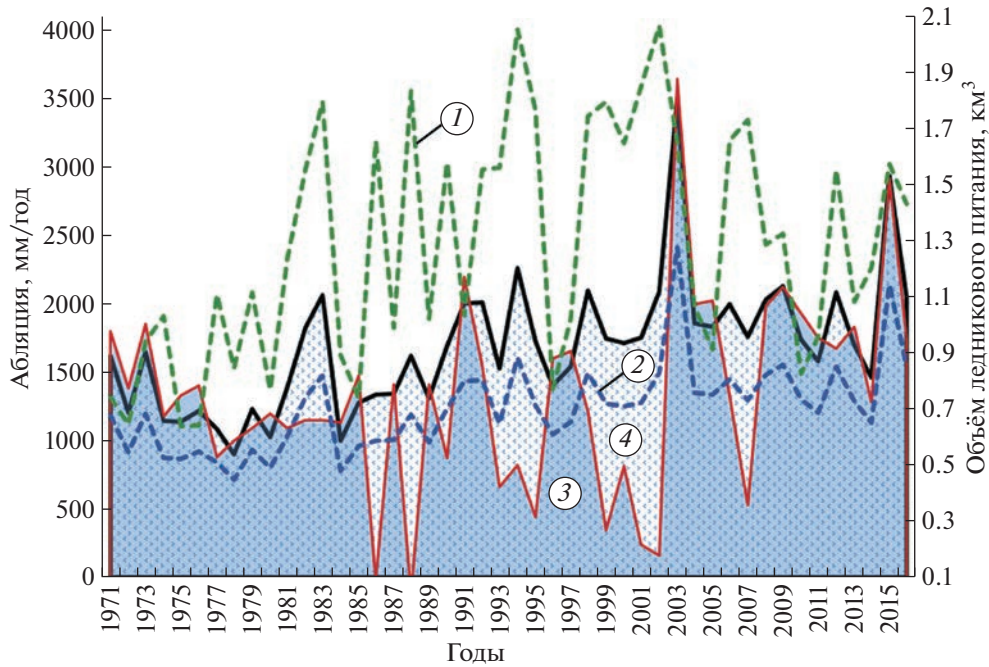


Рис. 3. Составляющие гидрологического режима в бассейне р. Рона.

1 – годовой слой абляции Ab на средней высоте в интервале $ELA_2 - Z_{end}$; 2 – годовой слой абляции Ab на высоте $Z_{mean} = Z_{ig}$; 3 – объём ледникового питания W_{gl1} с учётом высоты ELA_2 в конце периода абляции; 4 – объём ледникового питания V_{gl} без выделения типов тающей поверхности.

Fig. 3. Components of the hydrological regime in the Rhone River basin.

1 – annual ablation layer Ab at an average altitude in the interval $ELA_2 - Z_{end}$; 2 – annual ablation layer Ab at an altitude of $Z_{mean} = Z_{ig}$; 3 – the volume of glacial feeding W_{gl1} , taking into account the height of ELA_2 at the end of the ablation period; 4 – the volume of glacial feeding V_{gl} without differing the types of melting surface.

ОБСУЖДЕНИЕ

Представленная в работе линейная реконструкция ежегодных характеристик оледенения F_{gl} , Z_{end} , Z_{beg} , Z_{mean} между датами ограниченного мониторинга его режима основана на известном влиянии знака баланса массы ледников на изменение параметров F_{gl} , Z_{end} , Z_{beg} , Z_{mean} . То есть, отрицательный баланс массы приводит к сокращению площади F_{gl} , соответствующему изменению высот Z_{end} , Z_{beg} , Z_{mean} и, наоборот. Эта связь практически подтверждена на примере бассейна р. Рона, где по репрезентативным данным о температуре воздуха и осадков за 1971–2016 гг. получено линейное уравнение индекса баланса массы I_b для оледенения этого бассейна в виде $I_b = -0.029k + 0.685$ с коэффициентом детерминации 0.42. Иллюстрацией устойчивого сокращения F_{gl} в бассейнах рек Северного полушария, наряду с данными в (Fluctuations of Glaciers Database, 2017), служит также отрицательный градиент зависимостей $\delta = \delta(t)$ (см. табл. 2).

Опыт построения региональных зависимостей F_{gl} и других высотных параметров от времени (см. рис. 1), их надежность и обоснованность зависят от числа временных срезов между начальной и

конечной датами мониторинга режима оледенения. В настоящее время высотно-площадные характеристики ледников, необходимые для расчёта по изложенной в работе методике определения ледникового питания, доступны в публикациях (Fischer et al., 2014; Fluctuations of Glaciers Database; Nuimura et al., 2014; RGI Consortium, 2017; Paul et al., 2020; Каталог ледников России, 2021). Перечисленные региональные базы гляциологических данных неоднородны по составу и методам определения морфометрических характеристик ледников, что влияет на репрезентативность оценок изменения высотно-площадных параметров оледенения и расчетов ледникового питания в речных бассейнах.

Формула (2) привлекательна для приближённых региональных расчётов абляции. Более точные результаты можно получить путём применения локальных эмпирических коэффициентов в формуле (2). В настоящее время такие коэффициенты доступны по наблюдениям температуры воздуха и годовой абляции (Вилесов и др., 1980; Вилесов, 2016) на ледниках Абрамова (Памиро-Алай), Центральном Туюксу (Заилийский Алатау), Шумского (Джунгарский Алатау).

Научно-методической основой решения поставленной в работе проблемы служат получение и использование региональных эмпирических зависимостей $\delta = \delta(t)$, $T_4 = T_4(z, t)$, $T_s = T_s(z, t)$, $T_s = f(T_4, t)$, $A_b = f(T_s)$, $F_{gl} = f(t)$, $Z_{mean} = f(t)$. Практическое применение перечисленных зависимостей обусловлено свободным доступом к исходной климатической, гидрологической и гляциологической архивной и текущей информации.

Наиболее благоприятно обстоят дела с получением данных наблюдений за температурой воздуха и, соответственно, с расчетами по выражениям $T_4 = T_4(z, t)$, $T_s = T_s(z, t)$, $T_s = f(T_4, t)$ и годовой абляции по формуле (2). Помимо источников региональной климатической информации, перечисленных в списке литературы, глобальные многолетние данные наблюдений за осадками P и температурой воздуха T на метеорологических станциях вплоть до 2022 г. доступны из базы данных “Погода и климат”. Известно, что качество приборов и методов единичных измерений P и T на метеорологических станциях, регулируемое соответствующими национальными регламентами, изменялось во времени. Несмотря на неодинаковую плотность метеорологических станций и их расположение в горно-ледниковых речных бассейнах, для ряда основных районов современного материкового оледенения Евразии получены вертикальные профили распределения $T(Z)$ (см. табл. 1) вполне удовлетворительного качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе решения проблемы регионального расчёта и прогноза ледникового питания в горно-ледниковых речных бассейнах получены следующие новые результаты: 1) реконструированы и применены многолетние ежегодные значения высотно-площадных параметров оледенения; 2) установлены устойчивые региональные зависимости с высокими коэффициентами детерминации между многолетним изменением средней месячной температуры июня–августа T_s и апреля T_4 ; 3) впервые разработан и проверен метод регионального предсказания годовой абляции A_b на высоте фирновой границы $Z_{fg} = Z_{mean}$ как функции прогнозируемой средней летней температуры воздуха T_s ; для определения T_s в начале мая установлены региональные зависимости $T_s = f(T_4)$, и таким образом заблаговременность прогноза $A_b(Z_{fg})$ составляет один месяц; 4) впервые с заблаговременностью два года получены прогнозные значения средних для 2025–2054 гг. объёмов годового и вегетационного стока р. Рона как функции индекса ледникового питания δ ; 5) методические разработки автора, изложенные в работе, оказались востребованными (Lappalainen et al., 2022) при описании регионального взаимо-

действия криосферы с компонентами природной среды в Пан-Евразийском проекте (PEEX).

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания № 0148-2019-0004 (AAAA-A19-119022190172-5) “Оледенение и сопутствующие природные процессы при изменениях климата”.

Acknowledgments. The work is performed within the frameworks of the state task № 0148-2019-0004 (AAAA-A19-119022190172-5) “Glaciation and accompanying natural processes at climate changes”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.А.* Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 359 с.
- Вилесов Е.Н., Глазырин Г.Е., Ноздрюхин В.К.* К вопросу о зависимости годовой абляции на ледниках от средней летней температуры воздуха // Тр. САРНИГМИ. 1980. Вып. 71 (152). С. 101–104.
- Вилесов Е.Н.* Динамика и современное состояние оледенения гор Казахстана. Алматы: Казак Университети, 2016. 267 с.
- Голяндина Н.Э.* Метод “Гусеница” – SSA: прогноз временных рядов. СПб.: Изд-во СПб гос. ун-та, 2004. 52 с.
- Каталог ледников России // Электронный ресурс. <https://www.glacrus.ru/> (Дата обращения: 05.12.2022).
- Коновалов В.Г.* Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 237 с.
- Коновалов В.Г., Пиманкина Н.В.* Пространственно-временное изменение составляющих водного баланса на северном склоне Заилийского Алатау // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 453–471. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-453-471>
- Коновалов В.Г.* Региональный гидрологический режим горного оледенения // Изв. РАН. Сер. геогр. 2021. Т. 85. № 3. С. 368–379.
- Кренке А.Н., Ходаков В.Г.* О связи поверхностного таяния ледников с температурой воздуха // МГИ. 1966. Вып. 12. С. 153–164.
- Кренке А.Н.* Массообмен в ледниковых системах на территории СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 287 с.
- Погода и Климат // Электронный ресурс. <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php> (Дата обращения: 05.12.2022).
- Ходаков В.Г.* Водно-ледовый баланс районов современного и древнего оледенения СССР. М.: Наука, 1978. 192 с.
- Шульц В.Л.* Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 691 с.
- Bodo B.A.* Monthly Discharge Data for World Rivers (excluding former Soviet Union). Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research. // Электронный ресурс. <http://rda.ucar.edu/datasets/ds552.0/> (Дата обращения: 05.12.2022).
- EauFrance. // Электронный ресурс. <https://hydro.eaufrance.fr/> (Дата обращения: 30.01.2023).

- Federal Office for the Environment FOEN. Hydrological Data Service for watercourses and lakes // Электронный ресурс. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/water> (Дата обращения: 05.12.2022).
- Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss. Monthly and annual reports. // Электронный ресурс. <https://www.meteoswiss.admin.ch/> (Дата обращения: 05.12.2022).
- Fischer M., Huss M., Barboux C., 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. 2014. V 46. №. 4. P. 933–945.
- Fluctuations of Glaciers Database. World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. // Электронный ресурс. <https://wgms.ch/data-exploration/> (Дата обращения: 05.12.2022).
- Hock R. DEBAM and DETIM. Manual. 1999. Электронный ресурс. <https://github.com/regine/meltmodel.git> (Дата обращения: 05.12.2022).
- Klimawandel in der Schweiz. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), dem Bundesamt für Meteorologie, Klimatologie (MeteoSchweiz) und dem National Centre for Climate Services (NCCS) Bern, 2020. 105 p.
- 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.
- Lappalainen H.K., Petäjä T., Vihma T., Räisänen J., Baklanov A., Chalov S., Esau I., Ezhova E., Leppäranta M., Pozdnyakov D., Pumpanen J., Andreae M.O., Arshinov M., Asmi E., Bai J., Bashmachnikov I., Belan B., Bianchi F., Biskaborn B., Boy M., Bäck J., Cheng B., Chubarova N., Duplissy J., Dyukarev E., Eleftheriadis K., Forsius M., Heimann M., Juhola S., Konovalov V., Konovalov I., Konstantinov P., Köster K., Lapshina E., Lintunen A., Mahura A., Makkonen R., Malkhazova S., Mammarella I., Mammola S., Mazon S.B., Meinander O., Mikhailov E., Miles V., Myslenkov S., Orlov D., Paris Jean-D., Pirazzini R., Popovichcheva O., Pulliainen J., Rautiainen K., Sachs T., Shevchenko V., Skorokhod A., Stohl A., Suhonen E., Thomson E.S., Tsidilina M., Tynkkynen V., Uotila P., Virkkula A., Voropay N., Wolf T., Yasunaka S., Zhang J., Qiu Y., Ding A., Guo H., Bondur V., Kasimov N., Zilitinkevich S., Kerminen V., Kulmala M. Recent advances in the understanding of the northern Eurasian environments and of the urban air quality in China – a pan-Eurasian experiment (PEEX) programme perspective // Atmospheric Chemistry and Physics. 2022. V. 22. №. 7. P. 4413–4469.
- Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 849–864.
- Paul F., Rastner P., Azzoni R., Diolaiuti G., Fugazza D., Le Bris R., Nemeš J., Rabatel A., Ramusovic M., Schwaizer G., Smiraglia C. Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2 // Earth Syst. Sci. Data. 2020. V. 12. P. 1805–1821. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020>
- RGI Consortium. 2017. Randolph Glacier Inventory (RGI) – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report. Global Land Ice Measurements from Space. Boulder, Colorado, USA. Digital Media, 2017. 71 p. <https://doi.org/10.7265/N5.RGI.6.0>.
- Williams M.W., Konovalov V.G. Central Asia Temperature and Precipitation Data, 1879–2003. Boulder, Colorado: USA National Snow and Ice Data Center. 2008. // Электронный ресурс. <https://nsidc.org/> (Дата обращения: 05.12.2022).

Citation: Konovalov V.G. Calculation and forecast of glacial feeding in river basins. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (2): 188–198. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423020102

Calculation and Forecast of Glacial Feeding in River Basins

V. G. Konovalov^{a,*}

^a Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#] e-mail: vladgeo@gmail.com

A two-stage method has been developed for calculating and forecasting the annual volumes of glacial runoff feeding mountainous rivers. At the first stage, the series of morphological characteristics of glaciers are reconstructed using limited data from regional glaciation monitoring. An example of a numerical description and analysis of the annual reconstructed dynamics of glaciation parameters in the upper Rhone River (Switzerland) is presented. Similar results of reconstruction of annual values of the morphological characteristics were obtained for the basins of tributaries of the Terek River (North Caucasus) and the Western Kyzylsu River (Pamir). At the second stage, the calculation and forecast of the time series of the average summer air temperature $T_s(Z_{\text{mean}})$ at the height of Z_{mean} is performed, which is used as an argument for determining the ablation layer by the formula $Ab = f(T_s)$ on the glaciation area F_{gl} . The annual vertical profiles of mean air temperature of April $T_4 = T_4(Z)$, summer ones $T_s = T_s(Z)$, and formulas for calculating T_s as a function of T_4 are constructed and used for the calculations. Thus, on a regional scale, it was established for the first time that

the April air temperature T_4 allows calculating a thickness of the annual ablation layer $Ab = f(T_3)$ with a month earliness the forecast at the average height Z_{mean} of the glacier. The reconstructed $F_{\text{gl}}(t)$ series is used to obtain annual volumes of glacial alimentation. A regional study of variability of the index of glacial alimentation δ (Schultz, 1965) with time t was carried out using long-period measurements of runoff in the river basins of Eurasia, North America, Central Europe, and Central Asia. The index δ is equal to the ratio between the volumes W of flow or the average water discharges Q for the periods July–September (Q_{7-9}) and March–June (Q_{3-6}). As a result of the analysis of the expression $\delta = \delta(t)$, it was found that the gradient of the linear trend equation for the δ index in all the above river basins is negative, which is indicative of a reduction in glacial-snow alimentation, or more precisely – in only its glacial component. Notwithstanding this, the annual runoff Q_{year} decreased only in three basins, and in the others Q_{year} increased due to the growth of Q_{3-6} , which overlapped decreasing of Q_{7-9} . Index δ for the upper reaches of the Rhone River turned out to be not only a representative characteristic of changes in the vegetation period and annual runoff of the river, but also an efficient argument for the super-long-range prediction of these variables for 2025–2054 years.

Keywords: glacial runoff, Eurasia, North America, Central Europe, Asia, regional calculation, ablation, forecast timing

REFERENCES

- Alekseev G.A. Obiektivnye metody vyravnivaniia i normalizatsii korreliatsionnykh svyazei.* Objective methods of alignment and normalization of correlations. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: 359 p. [In Russian].
- Vilesov E.N., Glazyrin G.E., Nozdryuhin V.K.* On the dependence of yearly ablation on glaciers from the mean summer air temperature. *Trudy SARNIGMI. Proc. of SARNIGMI.* 1980. 71(152): 101–104 [In Russian].
- Vilesov E.N. Dinamika i sovremennoe sostoyanie oledeneniya gor Kazakstana.* Dynamics and modern state of the Kazakhstan mountains. *Almaty: Kazak Universiteti.* Almaty: Kazakhstan State University. 2016: 267 c. [In Russian].
- Golyandina N.E. Metod "Gusenica" – SSA: prognoz vremennykh ryadov.* Method "Caterpillar"–SSA: forecast of time ranges. Saint Petersburg: Saint Petersburg Publishing House. 2004: 52 c. [In Russian].
- Inventory of Russian glaciers Retrieved from: <https://www.glacrus.ru/> (Last access: 05.12.2022). [In Russian].
- Konovalov V.G. Tayanie i stok s lednikov v bassejnah rek Srednej Azii.* Melting and runoff from glaciers in the river basins of Central Asia. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985: 237 p. [In Russian].
- Konovalov V.G., Pimankina N.V. Prostranstvenno-vremennoe izmenenie sostavlyayushchih vodnogo balansa na severnom sklone Zailijskogo Alatau.* Spatio-temporal change of the components of the water balance on the northern slope of the Trans-Ili Alatau. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2016. 56 (4): 453–471 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-453-471>
- Konovalov V.G.* Regional hydrological regime of mountain glaciation. *Izvestiya Ros. Akad. Nauk. Seriya geograficheskaya. Proc. of RAS. Geographical series.* 2021. 85: 368–379. [In Russian].
- Krenke A.N., Hodakov V.G.* On the dependence of surficial melting of glaciers with air temperature. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1966, 12: 153–164 [In Russian].
- Krenke A.N. Massoobmen v lednikovyyh sistemah na territorii SSSR.* Mass exchange in glacial systems on the territory of the USSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 287 p. [In Russian].
- Weather and Climat. Retrieved from: <http://www.pogodai-klimat.ru/history.php> (Last access: 05.12.2022). [In Russian].
- Hodakov V.G. Vodno-ledovyy balans rajonov sovremennogo i drevnego oledeneniya SSSR.* Water-ice balance of the areas of modern and ancient glaciation of the USSR. Moscow: Nauka, 1978: 192 p. [In Russian].
- Shults V.L. Reki Srednej Azii.* Rivers of Central Asia. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1965: 691 p. [In Russian].
- Bodo B.A.* Monthly Discharge Data for World Rivers (excluding former Soviet Union). Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research. Retrieved from: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds552.0/> (Last access: 05.12.2022).
- EauFrance. Retrieved from: <https://hydro.eaufrance.fr/> (Last access: 05.12.2022).
- Federal Office for the Environment FOEN. Hydrological Data Service for watercourses and lakes. Retrieved from: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/water>. (Last access: 05.12.2022).
- Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss. Monthly and annual reports. Retrieved from: <https://www.meteoswiss.admin.ch/> (Last access: 05.12.2022).
- 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.* 2014, 46 (4): 933–945.
- Fluctuations of Glaciers Database. World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. Retrieved from: <https://wgms.ch/data-exploration/> (Last access: 05.12.2022).
- Hock R.* DEBAM and DETIM. Manual. 1999. Retrieved from: <https://github.com/regine/meltmodel.git> (Last access: 05.12.2022).
- Klimawandel in der Schweiz. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), dem Bundesamt für Meteorologie, Klimatologie (MeteoSchweiz) und dem National Centre for Climate Services (NCCS) Bern. 2020: 105 p.
- 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: 402–410.
- Lappalainen H.K., Petäjä T., Vihma T., Räisänen J., Baklanov A., Chalov S., Esau I., Ezhova E., Leppäranta M., Pozdnyakov D., Pumpanen J., Andreae M.O., Arshinov M., Asmi E., Bai J., Bashmachnikov I., Belan B., Bianchi F., Biskaborn B., Boy M., Bäck J., Cheng B., Chubarova N., Duplissy J., Dyukarev E., Eleftheriadis K., Forsius M., Heimann M., Juhola S., Konovalov V., Konovalov I., Konstantinov P., Köster K., Lapshina E., Lintunen A., Mahura A., Makkonen R., Malkhazova S., Mammarella I., Mammola S., Mazon S.B., Meinander O., Mikhailov E., Miles V., Myslenkov S., Orlov D., Paris Jean-D., Pirazzini R., Popovicheva O., Pulliainen J., Rautiainen K., Sachs T., Shevchenko V., Skorokhod A., Stohl A., Suhonen E., Thomson E.S., Tsidilina M., Tynkkynen V., Uotila P., Virkkula A., Voropay N., Wolf T., Yasunaka S., Zhang J., Qiu Y., Ding A., Guo H., Bondur V., Kasimov N., Zilitinkevich S., Kerminen V., Kulmala M.* Recent advances in the understanding of the northern Eurasian environments and of the urban air quality in China – a pan-Eurasian experiment (PEEX) programme perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022, 22 (7): 4413–4469.
- Nuimura T., Sakai A., Taniguchi K., Nagai H., Lamsal D., Tsutaki S., Kozawa A., Hoshina Y., Takenaka S., Omiya S., Tsunematsu K., Tshering P., Fujita K.* The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers. *The Cryosphere*. 2015, 9: 849–864.
- 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 Systems Science Data*. 2020, 12: 1805–1821.
<https://doi.org/10.5194/essd-12-1805-2020>
- RGI Consortium. 2017. Randolph Glacier Inventory (RGI) – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report. Global Land Ice Measurements from Space. Boulder, Colorado, USA. Digital Media. 2017: 71 p.
<https://doi.org/10.7265/N5 RGI 6.0>.
- Williams M.W., Konovalov V.G.* Central Asia Temperature and Precipitation Data, 1879-2003. Boulder, Colorado: USA National Snow and Ice Data Center. 2008. Retrieved from: <https://nsidc.org/> (Last access: 05.12.2022)