

НАПОЛНЕНИЕ И СБРОС ВОДЫ ИЗ ПРОРЫВООПАСНОГО ОЗЕРА МЕРЦБАХЕРА (ТЯНЬ-ШАНЬ)

FILLING-UP AND RELEASE OF WATER FROM THE OUTBURST DANGEROUS MERZBACHER LAKE (TIEN-SHAN)

КОНОВАЛОВ В.Г.

Ведущий научный сотрудник Института географии РАН, г. Москва, vladgeo@gmail.com

KONOVALOV V.G.

A leading scientist of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, vladgeo@gmail.com

Ключевые слова: озеро Мерцбахера; Тянь-Шань; гидрограф прорывной волны; моделирование многолетнего режима; интенсивность таяния; температура воздуха; атмосферные осадки.

Аннотация: методом «срезки» пиковых расходов на гидрографе стока реки Иньльчек (левого притока реки Сарыджас), обусловленных прорывом озера Мерцбахера на Тянь-Шане, рассчитаны объемы сброса воды из озера в 1963–1967 и 1981–1987 годах. Эти данные использованы для реконструкции многолетнего ряда объема озера V_{ML} в 1930–2005 годах как эмпирической функции суммы осадков за июнь–сентябрь на метеостанции «Тянь-Шань». Среднеквадратичная ошибка расчета объема озера 12,8 млн m^3 , или 10,0–5,8%, в интервале $V_{ML} = 130–220$ млн m^3 . В 1930–2005 годах минимальный объем сброса воды составил 89,4 млн m^3 , а максимальный — 231,9 млн m^3 . Временной тренд объема V_{ML} за 1930–1997 показал возрастание накопления и сброса воды из оз. Мерцбахера, что согласуется с убывающим трендом суммы осадков за июнь–сентябрь на метеостанции «Тянь-Шань». Выполнено обновление высотно-площадных параметров оледенения в бассейне озера Мерцбахера на основе дешифрирования и оцифровки контуров ледников на изображениях со спутников «ЛАНДСАТ 7+» и «ТЕРРА» в 2002 году. Определение составляющих притока воды озера Мерцбахера включает следующие блоки: модель наполнения озера, экстраполяция температуры воздуха и осадков, интенсивность таяния ледников, средняя толщина моренного покрова и ее пространственное распределение, расчет испарения. В результате расчетов для 1952–1985 годов установлено, что в среднем 47,9% объема V_{ML} формируется за счет таяния ледников, а остальная вода (52,1%) поступает из внеледниковой части бассейна. Минимальное и максимальное значения этих источников притока воды в озеро соответственно 17,8; 84,6 и 14,8; 82,2%. Распространение катастрофической прорывной волны зарегистрировано на расстоянии 150 км от места ее образования.

Key words: Merzbacher Lake; Tien-Shan; outburst wave hydrograph; long-term regime modeling; melting intensity; air temperature; atmospheric precipitation.

Abstract: catastrophic release of water volume from the outburst hazardous Merzbacher Lake calculated in 1963–1967 and in 1981–1987 by the method of «cutting» peak on hydrograph of Inylchek river runoff. The Inylchek is left tributary of the Sarydzhaz river. These results used to reconstruct the long-term series of lake volume V_{ML} in 1930–2005 as an empirical function of precipitation for June–September at the meteorological station Tien-Shan. Root mean square error of calculations is 12.8 million m^3 , or 10,0–5,8%, in the range of $V_{ML} = 130–220$ million m^3 . In 1930–2005 minimum amount of water outburst was 89.4 million m^3 , while the maximum — 231.9 million m^3 . Temporal trend of V_{ML} in 1930–1997 shows increase in the accumulation and outburst of water from the Merzbacher Lake, which is consistent with a decreasing trend in precipitation for June–September at the meteorological station Tien-Shan. Upgrading of area-altitudinal parameters of glaciers in the area of Merzbacher Lake basin fulfilled by decoding and digitizing of glacier contours in images from the satellites LANDSAT 7+ and TERRA obtained in 2002. Determination of water inflow to the Merzbacher Lake includes the following components: model of lake filling, extrapolation of air temperature and precipitation, intensity of glaciers melting, average thickness of moraine cover and its spatial distribution, calculation of evaporation. Computations for the 1952–1985 found out that on average 47.9% of V_{ML} volume is formed due to melting of glaciers and the rest part of water (52.1%) comes from outside of glacierized part of the basin. Minimal and maximal values of these sources of water inflow into the lake are respectively 17.8, 84.6% and 14.8, 82.2%. The spread of catastrophic outburst waves is recorded at a distance of 150 km from the place of its formation.

ВВЕДЕНИЕ

По мере убывания прочности плотин прорывоопасные озера в высокогорных областях речных бассейнов можно классифицировать как моренные, моренно-ледниковые и ледниковые водоемы. Первые расположены в устойчи-

вых понижениях рельефа морены различного возраста, и плотина у этих озер состоит из более или менее сцементированного осадочного и обломочного материала. Моренно-ледниковые озера находятся вблизи от концов ледников, и вода в них подпружена плотиной из рыхлой современной морены. Плотина

может включать ледяное ядро. Ледниковые озера относительно недолговечны и возникают вследствие динамики самих ледников (отступления, наступания, быстрых подвижек). Плотину образует тело ледника. Обзорные материалы по распространению и характеристикам прорывоопасных озер различного генезиса содержатся в обобщающих работах, например [4, 5, 7, 25, 26, 34], а также в региональных каталогах [26, 27, 29–32].

Озеро Мерцбахера находится на Центральном Тянь-Шане (рис. 1) в устье свободной ото льда долины ледника Северный Иньльчек. Образуется оно вследствие сезонного таяния снега и ледников, расположенных в бассейне этого озера выше подпруживающей плотины и прорывается, как правило, в конце периода абляции. Телом плотины служит основной ствол соседнего ледника Южный Иньльчек, который некогда составлял одно целое с ледником Северный Иньльчек (рис. 1–4).

Прорывы моренно-ледниковых и ледниковых озер происходят достаточно часто и нередко достигают масштаба катастроф. В бассейнах рек, где существует или планируется активная хозяйственная деятельность, такие явления вносят, как известно [4, 5, 26, 34], существенные изменения в обычный режим стока и водопользования. В связи с этим характеристика условий формирования озера Мерцбахера, разработка методов прогноза дат его прорывов, расчеты объемов сброшенной из него воды и построение гидрографов прорывной волны, безусловно, актуальны в научном и практическом отношении. Настоящее исследование направлено на решение следующих задач:

1) оценить объемы сброса воды из озера Мерцбахера по данным о стоке реки Иньльчек (левого притока реки Сарыджас);

2) рассчитать многолетние колебания объемов сброса воды путем моделирования условий наполнения озера;

3) охарактеризовать вклады ледникового и сезонного снегового стоков в формирование озера.

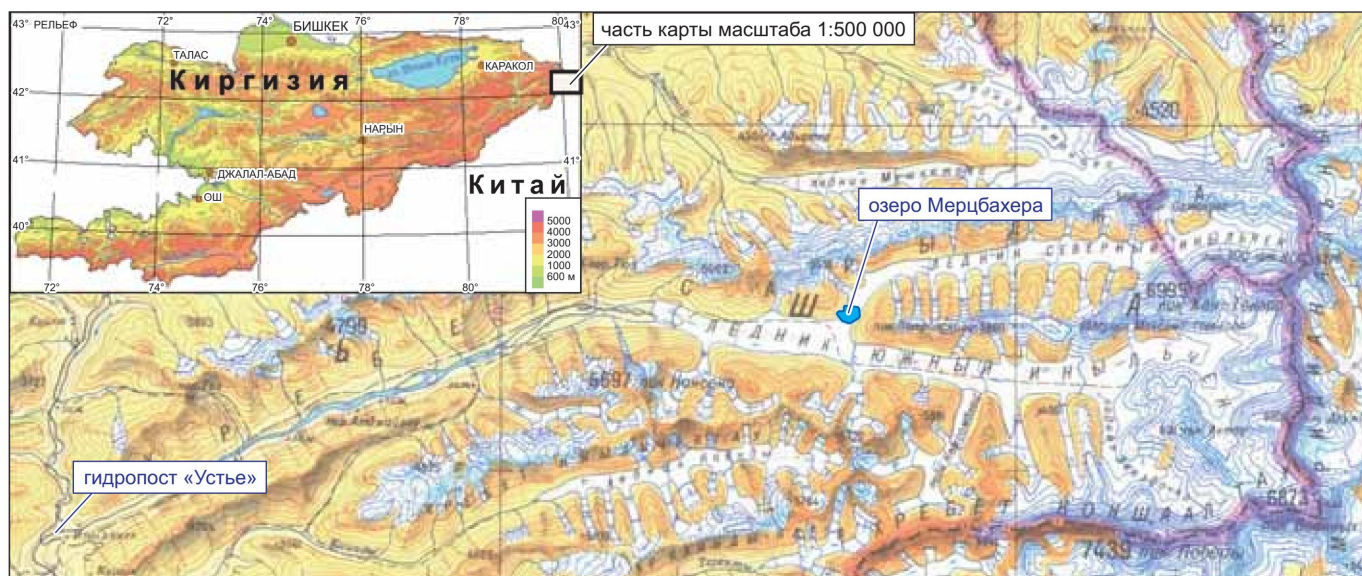


Рис. 1. Расположение района исследования на карте масштаба 1:500 000 (К-44-А) и в пределах территории Киргизии. Составлено по картам: а — 1:100 000 издания 1983–1984 годов (состояние местности на 1979 год); б — 1:200 000 издания 1975–1981 годов (состояние местности на 1969–1982 годы)

Исходные данные

История исследований рассматриваемого озера, обнаруженного экспедицией немецкого географа и альпиниста Готфрида Мерцбахера в 1903 году, насчитывает более 100 лет [24]. При этом значительная часть информации об элементах его режима страдает неполнотой или недостаточно надежна. Хотя по материалам аэрофото-съемки была получена батиметрическая карта озера, оценки его площади и объема существенно различаются [1, 2, 4–9, 17, 18]. По данным работы [9], объем озера в 1981 году был равен $0,129 \pm 0,005 \text{ км}^3$, площадь — $3,81 \text{ км}^2$,

средняя глубина — 33,85 м. Различные гипотезы о спусковом механизме, путях прорыва, размерах сбросных каналов пока не подтверждены. Недостаточно также данных прямых измерений элементов режима ледника Иньльчек и озера Мерцбахера в период его наполнения и сброса. Гидрометрические работы в устье реки Иньльчек, позволяющие получить гидрографы стока в периоды прорывов озера, проводились нерегулярно в течение ограниченного интервала времени. В имеющемся с 1932 года перечне дат начала и продолжительности сбросов воды из озера немало пробелов и приблизительных сведений [6].

Для решения поставленных задач в данной работе использованы следующие виды исходных данных:

1) *метеорологические данные*: многолетние ряды месячных сумм осадков, средней месячной температуры воздуха и баллов общей облачности на высокогорных метеостанциях «Койлю» (2800 м над уровнем моря) и «Тянь-Шань» (3614 м), а также продолжительность и интенсивность выпадения осадков [14, 21, 35];

2) *гидрологические данные*: результаты измерений в 1963–1967 и 1981–1987 годах стока и уровня воды в реке Иньльчек в периоды прорывов озера Мерцбахера [19, 22] (на гидро-

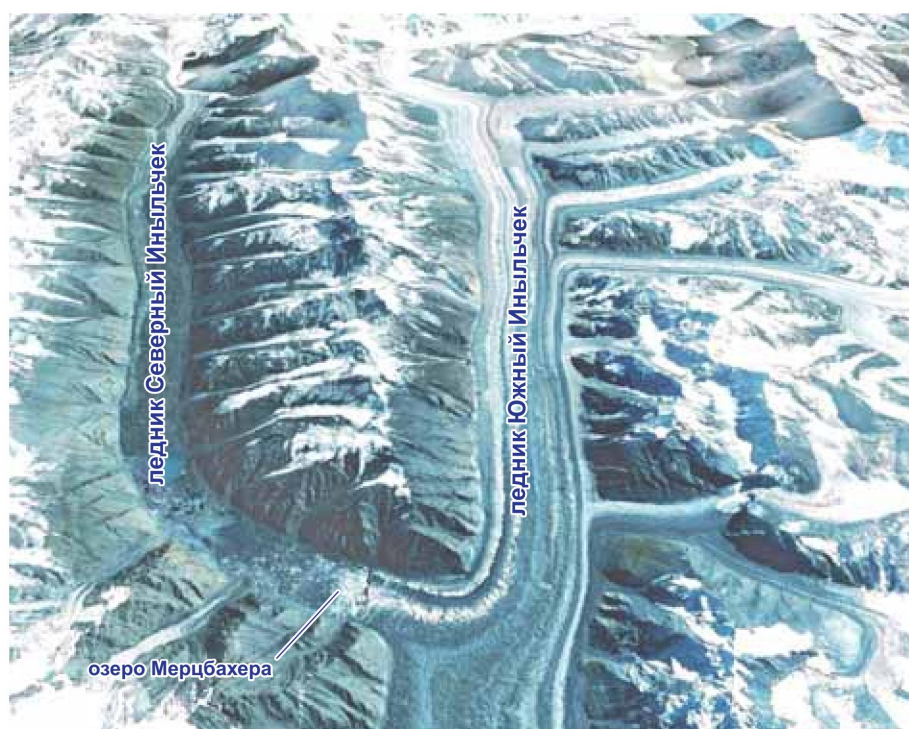


Рис. 2. Озеро Мерцбахера и ледники Северный Иньльчек и Южный Иньльчек



Рис. 3. Состояние озера Мерцбахера после прорыва в конце августа 1986 года. На переднем плане — озеро Верхнее, примыкающее к концу ледника Северный Иньльчек (фото В.Г. Коновалова с борта самолета АН-12 7 сентября 1986 года)

посту «Устье», который во время гидрометрических работ располагался в 50 км от конца ледника Иныльчек, площадь бассейна до гидропоста составляет 1730 км², средняя высота водосбора — 4120 м над уровнем моря;

3) гляциологические данные: (а) каталог ледников СССР [10]; (б) полевые измерения таяния на леднике Южный Иныльчек, выполненные сотрудниками Тянь-Шанской физико-географической станции [9]; (в) материалы дешифрирования и оцифровки контуров ледников на дистанционных изображениях бассейна озера Мерцбахера со спутников «ЛАНДСАТ 7+» и «ТЕРРА»; (г) результаты обработки векторных файлов ледников в целях регионализации оледенения на однородные группы и определения высотно-площадных параметров этих групп.

Определение объема воды, сброшенной из озера

Из-за исключительной труднодоступности рассматриваемого района для гидрометрических и топографических работ и специфических особенностей режима наполнения и сброса озера Мерцбахера до сих пор не получены точные сведения об объеме его ванны и о динамике его уровня в разные годы, не говоря уже о более детальной комплексной информации. В этой ситуации необходима разработка метода расчета объема воды, сброшенной из озера в период прорыва.

Ранее для расчета гидрографа прорывной волны Глазыриным и Соколовым [7], а также Виноградовым [4] были разработаны математические модели. Результаты расчетов по модели Глазырина — Соколова в значительной степени зависят от исходных данных, которые почти невозможно получить, — от площади поперечного сечения сбросного канала внутри ледника до начала прорыва, температуры воды в озере, его глубины, площади как функции глубины, эмпирического коэффициента. Поскольку у выхода реки Иныльчек из-под ледника невозможны измерения стока в период прорыва озера, результаты расчетов по модели Глазырина — Соколова сравнивать не с чем. Аналогичные заключения можно сделать и относительно модели Виноградова [4].

Вполне очевидно, что объем суточного стока реки Иныльчек в период прорыва озера (V_r) формируется одновременно в результате регулярного поступления воды от таяния снега и льда на площади водосбора, расположенной выше замыкающего гидроствора «Устье» (V_{gs}), а также вследствие катастрофического сброса воды из озера (V_{ML}). Резкое увеличение стока реки в период прорыва иллюстрируют графики на рис. 5. С помощью таких графиков нетрудно визуально определить даты начала и окончания прорыва и его продолжитель-



Рис. 4. Состояние озера Мерцбахера перед прорывом 10 октября 1989 года (фото В.Г. Коновалова с борта самолета АН-12 12 сентября 1989 года)

ность. До прорыва и после его окончания сток реки Иныльчек, по крайней мере в июне–сентябре, зависит практически только от суточного слоя таяния сезонного снега и многолетних запасов льда. Идея предложенного автором [12, 28] метода расчета объема сброса из оз. Мерцбахера заключается в выделении из гидрографа стока реки Иныльчек (на гидропосту «Устье») частей V_{gs} и V_{ML} путем «срезки» пиковых расходов воды в период прорыва озера. Эту «срезку» можно выполнять изложенными далее способами А и Б.

Способ А. Моделирование стока реки Иныльчек, не связанного со сбросом воды из озера Мерцбахера (объема V_{gs}). После чего объем V_{ML} получаем как разность ($V_r - V_{gs}$). Для расчета были использованы ежесуточные данные о стоке реки Иныльчек и материалы стандартных климатических наблюдений на метеостанции «Койлю».

Для расчета скользящих средних за пентаду расходов реки в июле–августе, не связанных с прорывом озера, было получено уравнение:

$$\bar{Q}_t = 0,77 \bar{Q}_{t-1} + 3,24\bar{\theta}_t - 14,53, \quad (1)$$

где $\bar{Q}_t$ — средний расход за текущую пентаду, м³/с; $\bar{Q}_{t-1}$ — то же со сдвигом на один интервал назад по времени t , м³/с; $\bar{\theta}_t$ — средняя температура воздуха на метеостанции «Койлю» за текущую пентаду, °С.

Сводный коэффициент корреляции уравнения (1) составляет 0,95, средняя квадратичная ошибка определения $\bar{Q}_t$ равна 8,5 м³/с. Уравнение (1) использовано в работе для расчетов того компонента гидрографа стока реки Иныльчек при прорыве озера, который сформировался вследствие ежедневного

таяния снега и льда на площади выше гидропоста «Устье» (см. рис. 5). Как видно из рис. 5, рассчитанный гидрограф достаточно хорошо согласуется со стоком, измеренным после окончания прорыва озера, когда единственным источником питания реки вновь становится объем талого снега и льда. Таким образом, уравнение (1) позволяет из всего объема стока Иныльчека в период прорыва выделить ту часть, которая образовалась в результате сброса из оз. Мерцбахера. Использование в данном случае скользящих средних за пентады расходов воды реки вместо ежесуточных значений принято для сглаживания случайных флуктуаций стока вследствие вероятных ошибок при гидрометрических измерениях. Располагая значениями средних расходов воды за две последовательные пентады и пятью величинами среднего суточного расхода в начале календарного периода, для которого выполняется скользящее осреднение, нетрудно от среднего пентадного представления информации перейти к ежедневным величинам. Для этой процедуры выведено общее выражение [12, 28].

Очевидно, что скользящие средние значения первой $\bar{x}_{n,1}$ и второй $\bar{x}_{n,2}$ пентад можно записать в следующем виде:

$$\bar{x}_{n,1} = 1/n(x_1 + \sum_{i=2}^5 x_i); \quad (2)$$

$$\bar{x}_{n,2} = 1/n(x_6 + \sum_{i=2}^5 x_i), \quad (3)$$

где n — количество осредняемых членов исходного ряда, $n = 5$; x_1, x_6 — первый и шестой члены исходного ряда соответственно.

После вычитания (3) из (2) и записи полученного результата относительно искомого значения x_6 получим:

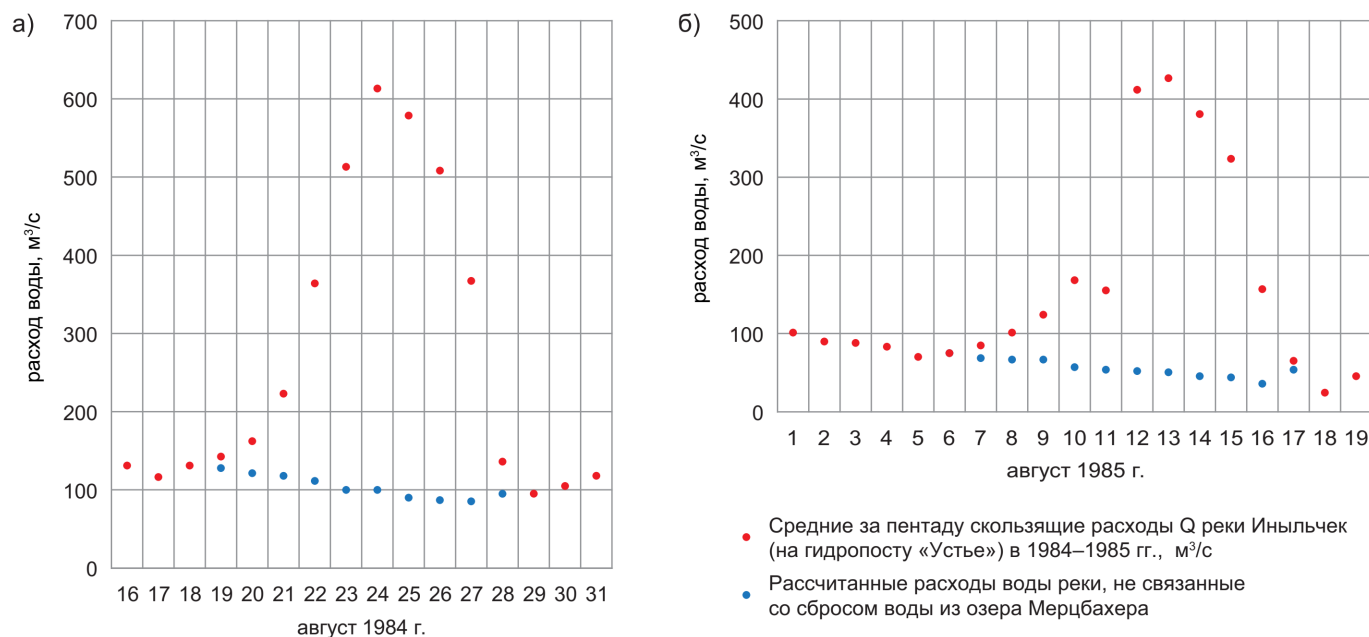


Рис. 5. Средние за пентаду скользящие расходы Q ($\text{м}^3/\text{с}$) реки Иныльчек (на гидропосту «Устье») в 1984–1985 годах. Голубым цветом (Q_{calcul}) изображены рассчитанные расходы воды реки, не связанные со сбросом воды из озера Мерцбахера

$$x_6 = x_1 + n(\bar{x}_{n,2} - \bar{x}_{n,1}) \quad (4)$$

аналогично:

$$x_7 = x_2 + n(\bar{x}_{n,3} - \bar{x}_{n,2}) \quad (5)$$

окончательно в общем виде:

$$x_{i+k} = x_k + n(\bar{x}_{n,k+1} - \bar{x}_{n,k}), \quad (6)$$

где N — общее количество членов исходного ряда, n — число членов в выборке для скользящего осреднения, $n = 5$; $i = n \div N$, $k = 1 \div (N - n)$.

Способ Б. Определение V_{gs} и V_{ML} в период прорыва озера можно выполнить также методом линейной интерполяции расходов воды между датами начала и окончания прорыва. Точность расчета V_{ML} — почти такая же, как и в предыдущем случае. Примеры распределения во времени общего объема воды, сброшенной из озера при прорыве, представлены на рис. 6.

В результате применения методов А и Б получены оценки сброса воды из оз. Мерцбахера в 1963–1967 и 1981–1987 годах, которые использованы для выявления зависимости объема V_{ML} от климатических факторов, влияющих на приток воды в озеро. В процессе поиска по данным многолетних наблюдений на метеостанциях «Койлю» и «Тянь-Шань» испытаны следующие варианты климатических факторов: (а) средняя летняя (июнь–август) температура воздуха T ; (б) суммы осадков за год, июнь–август $P_{(6-8)}$ и июнь–сентябрь $P_{(6-9)}$; (в) индексы баланса (I_B), аккумуляции (I_P) и таяния (I_T) осадков в виде:

$$\begin{aligned} I_{B(1)i} &= I_{Pi} - I_{Ti}, \\ I_{B(2)i} &= I_{Pi} - I_{Ti} - I_{Ci}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$I_{Pi} = (I_{Pi} - \bar{I}_P) / \bar{I}_P,$$

$$I_{Ti} = (I_{Ti} - \bar{I}_T) / \bar{I}_T$$

$$I_{Ci} = (I_{Ci} - \bar{I}_C) / \bar{I}_C,$$

C — средний балл общей облачности; i — порядковый номер временного ряда; диакритический символ означает среднее значение соответствующего временного ряда.

Для расчета индексов баланса $I_{B(1)}$ и $I_{B(2)}$ использованы средние значения температуры воздуха и общей облачности за июнь–август или июнь–сентябрь и суммы осадков за год, июнь–август и июнь–сентябрь. В результате оказалось, что сумма осадков за июнь–сентябрь $P_{(6-9)}$ на метеостанции «Тянь-Шань» обеспечивает вполне приемлемое качество расчета V_{ML} (млн м^3) по уравнению:

$$V_{ML} = 260,1 - 0,5241P_{(6-9)}. \quad (8)$$

Квадрат коэффициента корреляции зависимости (8) равен 0,782, критерий качества этого уравнения составил 0,47, среднеквадратичная ошибка рас-

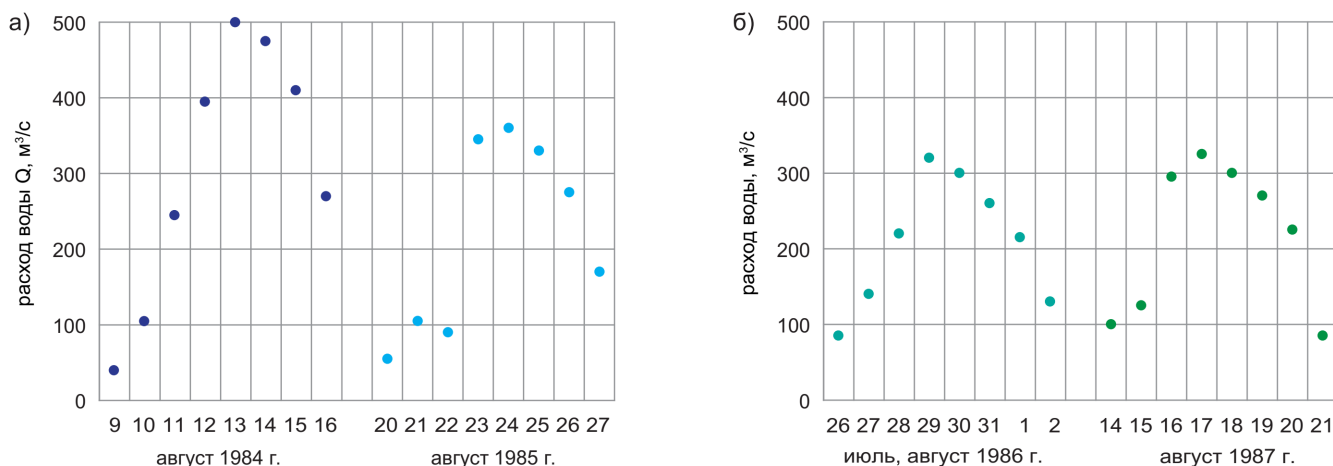


Рис. 6. Средние суточные расходы реки Иныльчек Q , обусловленные сбросом воды из озера Мерцбахера

Объемы сброса воды V_{ML} (млн м³) из оз. Мерцбахера в периоды прорывов и их обеспеченность $P_{rb}(V_{ML})^*$

Год	V_{ML}	$P_{rb}(V_{ML})$	Год	V_{ML}	$P_{rb}(V_{ML})$	Год	V_{ML}	$P_{rb}(V_{ML})$
1930	156,8	45,4	1956	145,3	29,7	1982	143,2	24,5
1931	155,8	42,8	1957	158,9	48,0	1983	181,8	76,8
1932	139,0	19,3	1958	154,7	40,2	1984	200,8	91,2
1933	182,5	78,1	1959	131,1	10,1	1985	164,7	52,0
1934	130,1	8,8	1960	186,2	83,3	1986	151,6	36,3
1935	141,1	21,9	1961	152,6	37,6	1987	150,0	33,7
1936	187,2	85,9	1962	154,7	38,9	1988	180,9	75,5
1937	165,7	55,9	1963	185,6	82,0	1989	208,2	92,5
1938	156,3	44,1	1964	121,2	4,9	1990	173,6	67,6
1939	141,1	20,6	1965	130,1	7,5	1991	228,1	96,4
1940	138,5	18,0	1966	170,4	61,1	1992	226,5	93,8
1941	179,9	74,2	1967	162,6	50,7	1993	195,6	87,3
1942	176,2	69,0	1968	170,4	59,8	1994	199,3	88,6
1943	161,5	49,3	1969	121,2	3,6	1995	230,7	97,7
1944	184,6	80,7	1970	134,3	14,1	1996	227,0	95,1
1945	165,7	54,6	1971	150,5	35,0	1997	231,9	99,0
1946	178,3	71,6	1972	137,9	16,7	1998	89,4	1,0
1947	200,3	89,9	1973	178,3	70,3	1999	143,6	25,8
1948	186,2	84,6	1974	137,4	15,4	2000	104,0	2,3
1949	128,5	6,2	1975	142,7	23,2	2001	144,1	27,1
1950	131,1	11,4	1976	165,7	53,3	2002	170,9	63,7
1951	155,8	41,5	1977	179,9	72,9	2003	158,5	46,7
1952	171,5	66,3	1978	183,0	79,4	2004	166,1	57,2
1953	144,2	28,4	1979	171,0	65,0	2005	146,3	31,0
1954	166,2	58,5	1980	146,3	32,4	min	89,4	-
1955	170,4	62,4	1981	132,7	12,7	max	231,9	-

* $P_{rb}(V_{ML})$ — вероятность (%) непревышения V_{ML} (интегральная функция нормального распределения V_{ML}).

чета — 12,8 млн м³, или 10,0÷5,8%, в интервале V_{ML} от 130 до 220 млн м³.

Результаты расчетов объемов сброса воды из оз. Мерцбахера в течение 1930–2005 годов приведены в табл. 1. В этом ряду минимальное и максимальное значения объемов V_{ML} оказались в идущих подряд календарных годах 1997-м и 1998-м, что привело к смещению оставшейся части ряда (рис. 7). Предположительно это могло быть следствием неточности измерения осадков в указанные два года на метеостанции «Тянь-Шань». Однако анализ многолетнего ряда наблюдений стока реки Сарыджас (называемой Аксу на территории Китая) с площадью водосбора 12 816 км² на расположенном ниже китайском гидропосту «Сехела» (Xiehela) [33] подтверждает наличие аномальных величин в эти же годы. Временной тренд объема V_{ML} за 1930–1997 годы показывает возрастание накопления и сброса воды из оз. Мерцбахера, что согласуется с убывающим трендом суммы осадков за июнь–сентябрь на метеостанции «Тянь-Шань». Отметим, что определение V_{ML} по фор-

муле (8) в 1981 году практически совпало с данными работы [9].

Определение составляющих притока в озеро Мерцбахера

Модель наполнения озера

В течение периода абляции сток в бассейне озера Мерцбахера формируется в результате таяния снега, льда и фирна на поверхности ледников и сезонного снега во внеледниковой части бассейна. Это значит, что даже когда ледники составляют относительно большую часть площади речного бассейна (> 50%), общий сток, измеряемый на замыкающем гидрологическом створе, включает существенный объем воды от таяния снега на склонах водосбора, свободных ото льда. В настоящее время доля площади оледенения составляет 57,7% от площади бассейна оз. Мерцбахера выше плотины, равной 322,7 км².

Методической основой расчета наполнения озера служит уравнение годового водного баланса речного бассейна в виде:

$$R = K_R (E + W_{gl}) + VW, \quad (9)$$

где R — сток, км³; P — осадки, км³; W_{gl} — таяние многолетних запасов льда и фирна, км³; E — испарение, км³; VW — динамические запасы воды в бассейне, км³; K_R — коэффициент трансформации в сток объема воды, поступившей на поверхность бассейна.

В уравнении (9) многолетний ряд объемов стока R — непосредственно измеряемая характеристика, а для определения других составляющих будем применять различные методы расчета. Для определения W_{gl} далее описан упрощенный вариант физико-статистической модели «РЕГМОД» для процессов аккумуляции и абляции снега и льда в гляциальных областях Центральной Азии, подробно изложенной в работах [13, 15, 16, 27].

Рассмотрим сначала ту часть стока, которая формируется в результате таяния на поверхности оледенения в бассейне. Примем, что к области абляции относится площадь ледника в интервале высот от его конца Z_e и до максимальной высоты снеговой границы в

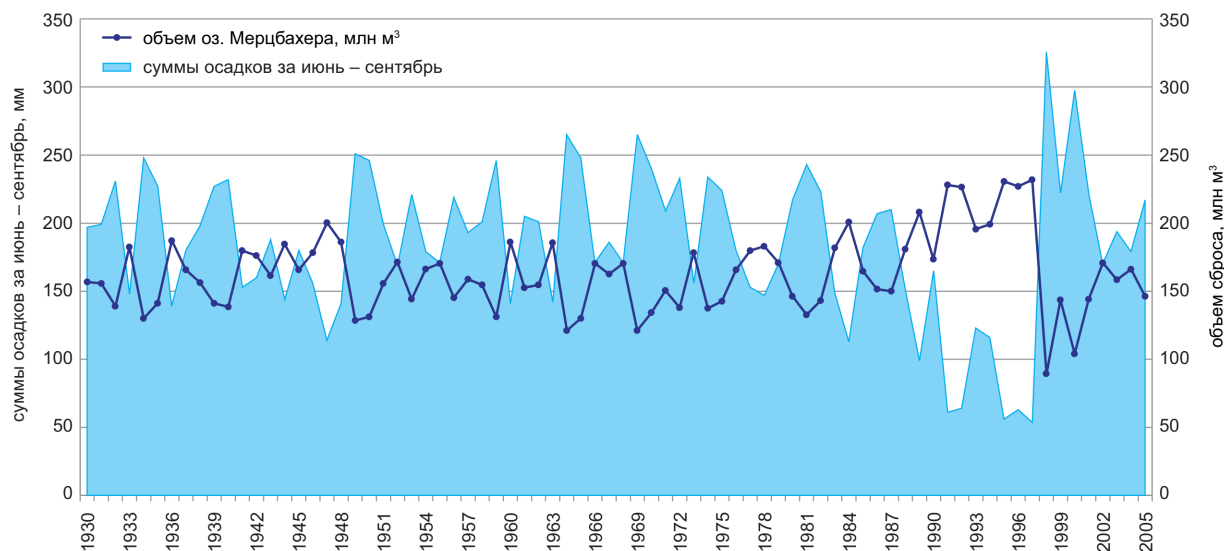


Рис. 7. Многолетнее изменение объема оз. Мерцбахера (Vol M_Lake)

конкретном году Z_{MAX} , а к области аккумуляции — площадь от высоты Z_{MAX} до начала ледника Z_b . Для расчета средних многолетних характеристик режима ледников вместо Z_{MAX} используется ее средняя величина Z_{fg} за известный интервал времени. Модель ледникового стока также должна учитывать возможность раздельной оценки объема таяния открытого льда и льда под моренным покровом.

Учитывая линейный характер связи между слоем таяния и высотой над уровнем моря [15], запишем в общем виде уравнения для определения годовых/сезонных объемов ледникового стока, который формируется в областях абляции V_{Ab} и аккумуляции V_{Ac} в интервалах высоты: $Z_e \div Z_{uml}$, $Z_{uml} \div Z_{MAX}$, и $Z_{MAX} \div Z_b$ (где Z_{uml} — верхний уровень распространения сплошного моренного покрова):

$$V_{Ab} = [M_1 (\tilde{Z}_{mor}) \cdot F_{mor} + M_2 (\tilde{Z}_{ice}) \cdot F_{ice}] \cdot K_{RAb}, \quad (10)$$

$$V_{Ac} = M_1 (\tilde{Z}_{Ac}) \cdot F_{Ac} \cdot K_{RAc}, \quad (11)$$

где $M_1 (\tilde{Z}_{mor})$, $M_2 (\tilde{Z}_{ice})$ и $M (\tilde{Z}_{Ac})$ — соответственно слои таяния на средних взвешенных высотах для площади сплошной морены F_{mor} , открытого льда F_{ice} и области аккумуляции F_{Ac} ; K_{RAb} и K_{RAc} — коэффициенты стока из областей абляции и аккумуляции; $F_{Ab} = F_{mor} + F_{ice}$ и $F(Ac)$ — соответственно площади областей абляции и аккумуляции.

Метод определения $M_1 (\tilde{Z}_{mor})$ детально описан в работах [13, 27]. Одним из основных компонентов в этом методе является расчет интенсивности таяния на открытой поверхности ледника.

Максимум внутригодового распределения осадков в бассейне реки Сарыджас, по данным метеостанции «Койлю», приходится на июнь–август. Летние снегопады в области оледенения останавливают таяние льда и фирна в течение периода выпадения осад-

ков, а затем вода, образовавшаяся в результате стаяния летнего снега, служит дополнительным источником наполнения озера. Учитывая различные условия стока из областей аккумуляции и абляции, расчет объемов поступления талой воды с площади оледенения выполняется отдельно для высотных интервалов $Z_e \div Z_{fg}$ и $Z_{fg} \div Z_{MAX}$. При этом принято, что из интервала $Z_e \div Z_{fg}$ вся вода попадает в русло реки, а в интервале $Z_{fg} \div Z_{MAX}$ при $Z_{MAX} > Z_{fg}$ часть объема таяния расходуется на внутреннее питание ледников. Для расчета объема поступления в целом для интервала высот $Z_e \div Z_{MAX}$ используется следующее выражение из работы [15]:

$$W_{gl} = V_{Ab} + (V_{Ac} - V_{Ab} / 3,5). \quad (12)$$

Из формул (10, 11) следует, что опорными точками на ледниках для расчета объемов таяния льда под мореной, открытого льда, старого фирна и летнего снега служат высоты Z_e , Z_{uml} , Z_{fg} , Z_{MAX} , Z_b и средние взвешенные высоты для интервалов $Z_e \div Z_{uml}$, $Z_{uml} \div Z_{MAX}$, $Z_e \div Z_{fg}$, $Z_{fg} \div Z_{MAX}$, и $Z_{MAX} \div Z_b$. Все высоты, за исключением Z_{MAX} и средних взвешенных, на момент каталогизации оледенения можно найти в справочнике [10]. Поскольку данные из него к настоящему времени устарели, вполне можно обновление высотно-площадных параметров оледенения в бассейне оз. Мерцбахера на основе дешифрирования и оцифровки контуров ледников на изображениях со спутников «ЛАНДСАТ 7+» и «ТЕРРА». В результате обработки векторных контуров ледников в среде ГИС «ИДРИСИ ТАЙГА» получены: общая площадь каждого ледника F_{gl} , его высотные параметры Z_e , Z_{fg} , Z_b , стандарт отклонения высот (СКО) на площади F_{gl} и распределение площади $F_{gl}(Z)$ как функции высоты над уровнем моря. Для расчетов площади в интервалах $Z_e \div Z_{uml}$, $Z_{uml} \div Z_{MAX}$, $Z_e \div Z_{fg}$, $Z_{fg} \div Z_{MAX}$, и

$Z_{MAX} \div Z_b$ принято, что интегральная функция $F_{gl}(Z)$ соответствует нормальному закону распределения. Площадь сплошной морены F_{mor} на леднике Северный Иньльчек заимствована из каталога [10]. На этом леднике находится основная часть (76,6%) моренного покрова на площади оледенения в бассейне оз. Мерцбахера. Впоследствии по величине F_{mor} и распределению $F_{gl}(Z)$ была найдена высота Z_{uml} .

По данным каталога [10], площадь оледенения в бассейне оз. Мерцбахера в 1943 году составляла 226,5 км². К 2002 году эта площадь сократилась до 186,1 км², или на 17,4%. В расчетах притока воды в оз. Мерцбахера в 1930–2005 годах использованы данные о современной площади оледенения, что могло несколько преуменьшить результаты в ранние годы. Скорее всего, это преуменьшение оказалось незначительным из-за включения в расчеты только части общей площади морены на ледниках.

Расчет составляющих притока воды по формулам (10–12) основан на применении метода генерализации параметров оледенения [11], когда отдельные ледники объединяются в характерные группы по принципу однородности значений ориентации и общей площади. По данным дешифрирования спутниковых снимков число ледников в бассейне оз. Мерцбахера в 2002 году равнялось 78, а после их генерализации число групп составило 45. Распределение ледников в бассейне озера иллюстрирует рис. 8. Высотно-площадные параметры групп ледников приведены в табл. 2. Наибольшего эффекта метод генерализации достигает в крупных речных бассейнах, например Амударья, Сырдарья, Инда, Ганга, Брахмапутра, Тарима.

Ключевым параметром в расчетах многолетнего режима наполнения оз. Мерцбахера является максимальная высота сезонной снеговой границы

Высотно-площадные параметры 45 групп ледников в бассейне оз. Мерцбахера в 2002 году*

№	Az	Limits F_{gl}	Sub	N_{Sub}	$\bar{Z}_e$	$\bar{Z}_b$	$\bar{Z}_{mean}$	CKO	Long	Lat	Vol	F_{gl1}	F_{gl2}	$F_{gl}(\bar{Z}_{mean})$
1	C	(0, 0,1]	1	3	3676,8	4033,9	3935,6	101,95	79,99	42,22	0,00213	0,253	0,084	0,042
2	C	(0,1, 0,2]	2	2	3552,1	3579,6	3576,3	7,38	79,99	42,22	0,00492	0,339	0,169	0,082
3	C	(0,2, 0,3]	3	2	3630,0	4205,3	3849,9	142,96	79,90	42,21	0,00901	0,558	0,279	0,138
4	C	(0,3, 0,4]	4	1	3926,0	4014,0	3937,5	24,59	80,11	42,23	0,01159	0,345	0,345	0,171
5	C	(0,4, 0,5]	5	2	3560,0	4158,3	3731,1	120,62	79,98	42,22	0,01597	0,894	0,447	0,220
6	C	(0,6, 0,7]	7	1	3670,0	4085,0	3799,5	185,38	80,02	42,23	0,02298	0,608	0,608	0,301
7	C	(0,7, 0,8]	8	1	3316,0	4339,0	3882,1	250,32	79,87	42,20	0,02819	0,720	0,720	0,358
8	C	(0,8, 0,9]	9	3	3592,4	4350,8	3973,3	214,23	80,00	42,21	0,03422	2,536	0,845	0,421
9	C	(0,9, 1,0]	10	1	4274,0	4760,0	4696,5	71,65	80,02	42,21	0,04009	0,964	0,964	0,489
10	C	(1,5, 2,0]	12	3	3529,1	4813,7	4200,7	317,54	79,97	42,20	0,08790	5,521	1,840	0,922
11	C	(2,0, 2,5]	13	1	3359,0	4845,0	4167,7	411,04	79,92	42,20	0,12306	2,441	2,441	1,222
12	C	(3,0, 4,0]	15	3	3625,3	4840,8	4236,4	310,30	80,01	42,20	0,19585	10,724	3,575	1,791
13	C	(5,0, 6,0]	17	1	3597,0	4945,0	4214,4	295,90	80,00	42,21	0,31858	5,369	5,369	2,688
14	C	(6,0, 8,0]	18	3	3804,8	5325,9	4372,2	357,53	80,07	42,21	0,44589	21,055	7,018	3,519
15	CB	(0,3, 0,4]	4	1	4043,0	4692,0	4313,0	280,46	80,02	42,22	0,01354	0,392	0,392	0,198
16	CB	(0,5, 0,6]	6	1	3613,0	4085,0	3952,7	170,74	80,01	42,22	0,02084	0,561	0,561	0,279
17	C3	(0, 0,1]	1	2	4045,3	4190,4	4126,6	44,50	79,88	42,19	0,00238	0,186	0,093	0,047
18	C3	(0,1, 0,2]	2	4	3566,3	3879,5	3679,0	102,96	79,92	42,21	0,00392	0,540	0,135	0,066
19	C3	(0,2, 0,3]	3	2	3571,0	3889,5	3654,2	86,58	80,00	42,22	0,00812	0,499	0,250	0,122
20	C3	(0,3, 0,4]	4	1	3930,0	4533,0	4484,7	150,45	79,93	42,20	0,00999	0,305	0,305	0,155
21	C3	(1,0, 1,5]	11	1	3308,0	4588,0	3953,9	192,13	79,87	42,19	0,05305	1,216	1,216	0,606
22	Ю	(0, 0,1]	1	4	4302,5	4694,8	4472,7	114,94	79,99	42,25	0,00165	0,201	0,050	0,026
23	Ю	(0,1, 0,2]	2	6	4698,7	5036,9	4878,3	137,72	79,86	42,26	0,00443	0,887	0,148	0,078
24	Ю	(0,2, 0,3]	3	4	4507,4	4887,6	4654,0	102,05	79,93	42,26	0,00749	0,945	0,236	0,122
25	Ю	(0,3, 0,4]	4	2	4283,9	4839,1	4651,5	166,93	80,04	42,26	0,01192	0,694	0,347	0,178
26	Ю	(0,5, 0,6]	6	1	4785,0	4970,0	4930,3	73,21	79,98	42,26	0,01935	0,527	0,527	0,271
27	Ю	(0,6, 0,7]	7	1	4261,0	5117,0	4659,7	235,84	79,83	42,24	0,02624	0,678	0,678	0,345
28	Ю	(0,9, 1,0]	10	1	4434,0	5587,0	5238,7	367,14	80,12	42,26	0,04118	0,986	0,986	0,507
29	Ю	(1,0, 1,5]	11	2	4252,6	4823,0	4521,7	178,97	79,86	42,25	0,04805	2,240	1,120	0,566
30	Ю	(1,5, 2,0]	12	1	4199,0	4970,0	4734,6	215,95	79,97	42,27	0,08757	1,841	1,841	0,932
31	Ю	(2,0, 2,5]	13	2	4301,1	5223,2	4925,2	258,37	80,05	42,27	0,11230	4,498	2,249	1,140
32	Ю	(2,5, 3,0]	14	1	4088,0	5006,0	4673,5	219,48	79,99	42,27	0,12772	2,518	2,518	1,271
33	Ю	(3,0, 4,0]	15	1	4388,0	5334,0	4791,6	314,52	80,19	42,28	0,17804	3,315	3,315	1,674
34	Ю	(4,0, 5,0]	16	2	4012,3	5217,4	4763,5	270,26	80,04	42,27	0,26022	9,075	4,537	2,287
35	Ю	(6,0, 8,0]	18	1	3966,0	5285,0	4827,8	291,99	80,10	42,27	0,46694	7,369	7,369	3,710
36	Ю	(8,0, 10,0]	19	1	4145,0	5587,0	4846,4	324,41	80,14	42,27	0,63549	9,513	9,513	4,787
37	ЮВ	(0,1, 0,2]	2	1	4545,0	4582,0	4551,5	14,11	79,86	42,25	0,00329	0,122	0,122	0,063

№	Az	Limits F_{gl}	Sub	N_{Sub}	$\tilde{Z}_e$	$\tilde{Z}_b$	$\tilde{Z}_{mean}$	CKO	Long	Lat	Vol	F_{gl1}	F_{gl2}	$F_{gl}(\tilde{Z}_{mean})$
38	ЮВ	(3,0, 4,0]	15	1	4182,0	5117,0	4686,9	316,01	79,83	42,24	0,16558	3,122	3,122	1,574
39	ЮВ	(4,0, 5,0]	16	1	3853,0	5263,0	4672,4	336,61	79,80	42,23	0,22446	4,017	4,017	2,023
40	ЮЗ	(0, 0,1]	1	1	4909,0	5269,0	4978,5	142,68	80,11	42,26	0,00195	0,079	0,079	0,042
41	ЮЗ	(0,3, 0,4]	4	1	4446,0	5213,0	5074,1	154,98	80,04	42,27	0,01112	0,333	0,333	0,174
42	ЮЗ	(0,5, 0,6]	6	1	4629,0	5165,0	5041,8	190,95	80,07	42,27	0,02012	0,545	0,545	0,281
43	ЮЗ	(1,0, 1,5]	11	1	4318,0	4986,0	4771,3	134,68	79,95	42,26	0,04493	1,060	1,060	0,539
44	В	(0,3, 0,4]	4	1	4679,0	4945,0	4829,2	128,14	80,01	42,20	0,01062	0,321	0,321	0,166
45	3	(70,0, 100,0]	22	1	3317,0	5650,0	4276,3	494,88	80,13	42,25	7,70047	75,149	75,149	37,597

* № — номер группы; A_z — ориентация ледника; Limits F_{gl} — пределы площади (км²), использованные при регионализации оледенения; Sub — номер подгруппы; N_{Sub} — число ледников в подгруппе; $\tilde{Z}_e$, $\tilde{Z}_b$, $\tilde{Z}_{mean}$ — соответственно высоты конца, начала и многолетней фирновой границы (м над уровнем моря); CKO — стандарт отклонения высот (м); Long — долгота (град. в.д.), Lat — широта (град. с.ш.); Vol — суммарный объем ледников в группе (км³); F_{gl1} — общая площадь ледников в группе, $F_{gl2} = F_{gl1}/N(Sub)$ — площадь «среднего ледника» в группе, $F_{gl}(\tilde{Z}_{rehe})$ — площадь от $\tilde{Z}_e$ до $\tilde{Z}_{mean}$.

Z_{MAX} , поскольку от нее зависит соотношение стокообразующих площадей (лед под мореной, открытый лед, старый фирн, сезонный снег) на ледниках в течение рассматриваемого интервала 1930–2005 годов. На основании результатов предыдущих исследований [13, 15] значения Z_{MAX} для 45 групп ледников рассчитаны по следующим формулам:

$$Z_{MAX}(i)_k = Z_e(k) + \Delta Z_{MAX}(k) \times P_{rb}(V_{ML})_i; \quad (13)$$

$$\Delta Z_{MAX}(k) = Z_b(k) - Z_e(k), \quad (14)$$

где i — номер года, k — номер группы, $P_{rb}(V_{ML})_i$ — вероятность непревышения V_{ML} в i -м году из табл. 1, д.ед.; $Z_b(k)$, $Z_e(k)$ берем из табл. 2.

Поскольку объем озера получен по формуле (8) как функция суммы осадков за июнь–сентябрь на метеостанции «Тянь-Шань», выражение (13) описывает обратную линейную зависимость между Z_{MAX} и суммой осадков, то есть, при прочих равных условиях, чем больше осадков, тем ниже $Z_{MAX}(i)_k$, и наоборот.

Экстраполяции температуры воздуха и осадков

Общий вид формулы для расчета объемов осадков, испарения и других переменных как одномерных функций высоты z в заданном интервале $Z_{min} \div Z_{max}$ следующий:

$$X_z = \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} x(z)s(z)dz, \quad (15)$$

где $s(z)$ — распределение площади по высоте в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$.

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

$$X_z = x(\tilde{z}) \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} s(z)dz, \quad (16)$$

где

$$F = \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} s(z)dz —$$

площадь в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$.

В итоге:

$$X_z = x(\tilde{z})F, \quad (17)$$

или для среднего значения:

$$\bar{x} = x(\tilde{z}), \quad (18)$$

где $\tilde{z}$ — некоторая высота в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$.

В работе [3] показано, что в случаях, когда функция $x(z)$ аппроксимирована параболой, общий вид формулы для определения среднего значения переменной x в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$ следующий:

$$\bar{x}(\tilde{z}) = x(z_0)[1 + k_2(\tilde{z} - z_0) + k_3(\tilde{z} - z_0)^2] + x(z_0)k_3\sigma_z^2, \quad (19)$$

а для линейного варианта $x(z)$:

$$\bar{x}(\tilde{z}) = x(z_0)[1 + k_2(\tilde{z} - z_0)], \quad (20)$$

где первый член в правых частях уравнений (19, 20) равен $\bar{x}(\tilde{z})$ при заданном значении $x(z_0)$ на высоте z_0 ; k_2 , k_3 — эмпирические коэффициенты; σ_z^2 — дисперсия z в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$.

Таким образом, для любых линейных и квадратичных функций имеет место строгое равенство между осредненной величиной зависимой переменной и ее значением на средней взвешенной высоте в интервале $Z_{min} \div Z_{max}$. Рабочая формула для расчета июньских осадков (P_6) в интервалах высот $Z_e \div Z_{MAX}$, $Z_e \div Z_{fg}$, $Z_{fg} \div Z_{MAX}$ на ледниках, полученная на основе общего выражения (19) имеет вид:

$$\bar{P}_6(\tilde{z}) = P_6(\text{Койлю}, z_0 = 2,8) \times [1 + 2,29(\tilde{z} - z_0) - 0,56(\tilde{z} - z_0)^2]. \quad (21)$$

В данном случае символ ($\tilde{z}$) относится к средней взвешенной высоте в каком-либо из интервалов $Z_e \div Z_{MAX}$, $Z_e \div Z_{fg}$, $Z_{fg} \div Z_{MAX}$.

Аналогично выглядят формулы для расчета осадков в июле и августе, но с другими значениями коэффициентов k_2 и k_3 .

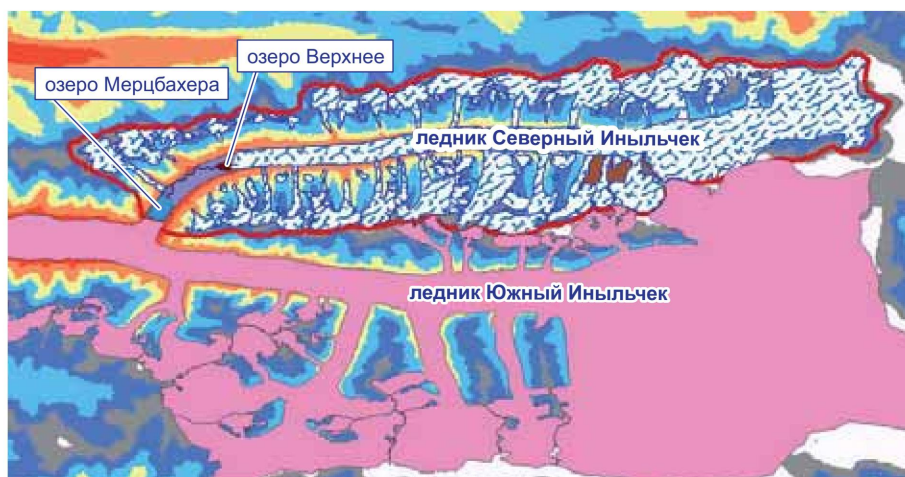


Рис. 8. Схема оледенения в бассейне оз. Мерцбахера по материалам дистанционного зондирования 2002 года со спутников «ЛАНДСАТ 7+» и «ТЕРРА». Граница бассейна выделена линией красного цвета

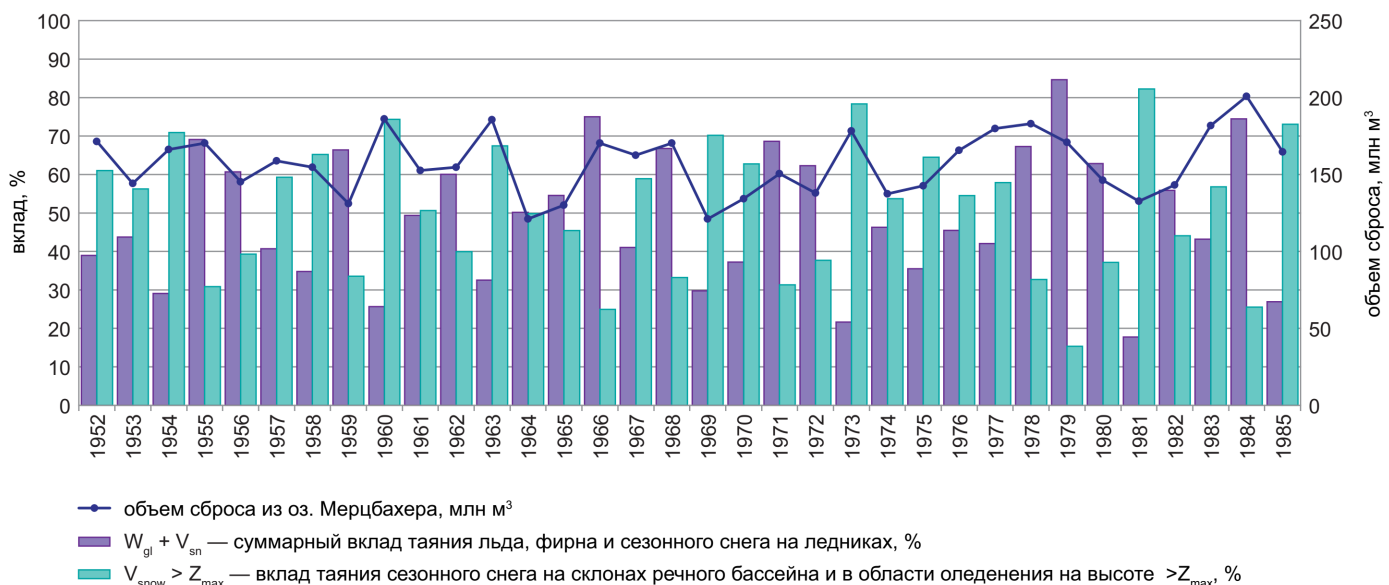


Рис. 9. Многолетнее изменение объемов сброса из оз. Мерцбахера (Vol M_Lake, млн м³) и составляющих притока воды в него

Интенсивность таяния ледников в бассейне озера Мерцбахера

В результате обработки экспедиционных измерений таяния льда на леднике Южный Иныльчек [9] была получена локальная формула для интенсивности таяния $M(z)$ (см) как функция средней температуры воздуха на метеостанции «Койлю» [12, 28]:

$$M(z) = 0,75 \cdot \bar{T}(\text{Койлю}) + 1,2. (22)$$

Согласно выражению (22) при температуре воздуха менее минус 1,6 °С таяние становится меньше нуля, что может не соответствовать реальным условиям формирования стока. Для большей обоснованности расчета $M(z)$ как функции средней летней температуры воздуха впервые разработана формула суточной интенсивности таяния в июне–августе, по структуре аналогичная известному выражению для экстраполяции по высоте температуры воздуха:

$$M(z) = M(z_0) - \alpha(z - z_0). (23)$$

И конкретно для условий в бассейне оз. Мерцбахера:

$$M(z) = \{[0,75 \cdot \bar{T}(\text{Тяньшань}, z_0 = 0,36) + 1,2] \cdot 10 - \alpha(z - 3614)\} / N_d. (24)$$

где $\bar{T}$ (Тяньшань, $z_0 = 0,36$) — средняя летняя температура воздуха на метеостанции «Тянь-Шань», °С; z_0 — высота метеостанции «Тянь-Шань», $z_0 = 3614$ м над уровнем моря; α — градиент изменения таяния в зависимости от высоты над уровнем моря, $\alpha = 3,546$ мм/лето; N_d — число дней в июне–августе, $N_d = 92$.

Часть формулы (24) в квадратных скобках характеризует интенсивность суточного таяния в июне–августе на уровне метеостанции «Тянь-Шань», а

в другой части выполняется экстраполяция этой величины на заданную высоту z . Величина α определена автором по данным многолетних измерений летнего баланса массы на ряде ледников Центральной Азии из справочной работы [23].

Для расчета интенсивности таяния $M(h_c)$ под моренным покровом толщиной h_c использована простая формула:

$$M(h_c) = f(h_c) \cdot M, (25)$$

где $f(h_c)$ — безразмерная функция, имеющая в интервале $0 < h_c < 2$ см максимум и две характерные точки, в которых $f(h_c) = 1$; M — интенсивность таяния открытого льда.

В работах [13, 27] получено общее выражение для $f(h_c)$:

$$M(h_c)/M = K/(1 + \beta_1(h_c - h_0)^2), (26)$$

где $K = 1,34$; β_1 , h_0 можно установить по результатам экспериментальных измерений $M(h_c)$. Практические расчеты по формуле (26) упрощаются путем применения следующих выражений: для морены толщиной h_c от 0 до 2 см:

$$f(h_c)_1 = 0,1494 h_c^3 - 0,5642 h_c^2 + 0,4312 h_c + 0,999; (27)$$

для морены толщиной h_c более 2 см:

$$f(h_c)_2 = 1,4971 h_c^{-0,623}. (28)$$

Средняя толщина морены на конце ледника и ее распределение в интервале $Z_e \div Z_{uml}$

В результате исследований [13, 15, 27] установлено, что функция распределения средней толщины морены в интервале $Z_e \div Z_{uml}$ имеет вид:

$$\bar{h}_c(z) = H_c(Z_e) - H_c(Z_e)(z - Z_e)/(z_{uml} - Z_e), (29)$$

где $H_c(Z_e)$ — средняя толщина морены на конце ледника.

Для расчета $\bar{h}_c(z)$ по формуле (29) необходимы данные об $H_c(Z_e)$. В работах [13, 15, 27] решение этого вопроса основано на региональной зависимости $H_c(Z_e) = f(\Omega)$, где Ω — отношение площадей сплошного моренного покрова и области абляции. Информация для определения Ω содержится в каталоге [10]. В качестве численной аппроксимации зависимости $H_c(Z_e) = f(\Omega)$ применяется следующая эмпирическая формула [27]:

$$H_c(Z_e) = 88 \cdot \Omega \text{ (см)}. (30)$$

Коэффициент корреляции для зависимости (30) равен 0,97. После того как найден способ определения, вычисление среднего слоя морены в интервале высот $\Delta z = z - Z_e$ трудностей не представляет и, учитывая линейный вид функции, выполняется по формуле:

$$\bar{h}_c(\Delta z) = H_c(Z_e) \cdot (\Delta Z_c - \Delta z) / \Delta Z_c, (31)$$

где $\Delta z \leq \Delta Z_c$ — заданный интервал высоты в пределах площади сплошного моренного покрова на ледниках, $\Delta Z_c = Z_{uml} - Z_e$.

Расчет испарения

Общий вид формул для определения объема испарения E_v (км³/год) в i -й группе ледников следующий:

$$E_v = e(\bar{z}) \cdot F_{Ab}; (32)$$

$$e(\bar{z}) = P_e(\bar{z}) \cdot th[P_s(\bar{z}) / P_e(\bar{z})]; (33)$$

$$P_s(\bar{z}) - M(\bar{z}) = 0; (34)$$

$$P_e = 0,0018 (25 + T_s(\bar{z})^2 (100 - r(\bar{z}))); (35)$$

$$E_n(\bar{z}) = 6,1 \cdot 10 \cdot \{7,45 \cdot T_s(\bar{z}) / [235 + T_s(\bar{z})]\} (36)$$

$$E(\bar{z}) = 0,1525^2 - 3,2132 + 14,34; \quad (37)$$

$$r(\bar{z}) = E(\bar{z}) / E_n(\bar{z}), \quad (38)$$

где e — суммарный за лето (июнь–август) слой испарения, мм; $\bar{z}$ — средняя взвешенная высота в интервале

$Z_e \div Z_{MAX}$; F_{Ab} — площадь области абляции; th — гиперболический тангенс; T_s — средняя за лето температура воздуха; P_e — наибольшая возможная величина испарения при данных условиях увлажнения, P_s — сезонная сумма осадков.

Формула (33) — это известное уравнение Ольдекопа для расчета испарения, (34) — уравнение баланса аккумуляции и абляции на высоте фирновой границы, (35) — формула Романенко [20] для расчета наибольшей возможной величины испарения P_e

Таблица 3

Характеристики притока воды в озеро Мерцбахера в 1952–1985 годах*

Год	V_{ML}	V_{sn1} ($< Z_{MAX}$)	W_{gl}	W_{run}	V_{sn2} ($> Z_{MAX}$)	W_{run}/V_{ML}	V_{sn2}/V_{ML}	F_{gl} ($Z_{MAX}-Z_e$)	F_{gl} (Z_b-Z_{MAX})
	млн м ³					%		км ²	
1952	171,5	48,129	18,709	66,838	104,649	39,0	61,0	173,3	12,8
1953	144,2	44,197	18,875	63,072	81,162	43,7	56,3	175,4	10,7
1954	166,2	37,051	11,286	48,337	117,909	29,1	70,9	161,0	25,1
1955	170,4	90,523	27,291	117,813	52,626	69,1	30,9	156,8	29,3
1956	145,3	39,769	48,406	88,175	57,107	60,7	39,3	59,2	126,9
1957	158,9	54,511	10,169	64,680	94,228	40,7	59,3	135,3	50,8
1958	154,7	11,742	42,077	53,818	100,898	34,8	65,2	39,1	147,0
1959	131,1	74,202	12,895	87,097	44,035	66,4	33,6	128,6	57,5
1960	186,2	25,950	21,816	47,765	138,396	25,7	74,3	152,2	33,9
1961	152,6	18,891	56,476	75,367	77,252	49,4	50,6	45,3	140,8
1962	154,7	57,030	35,881	92,911	61,805	60,1	39,9	114,2	71,9
1963	185,6	49,622	10,790	60,412	125,225	32,5	67,5	178,8	7,3
1964	121,2	27,087	33,703	60,789	60,384	50,2	49,8	74,5	111,6
1965	130,1	17,460	53,500	70,960	59,123	54,5	45,5	40,5	145,6
1966	170,4	25,556	102,346	127,902	42,537	75,0	25,0	121,6	64,5
1967	162,6	36,980	29,781	66,761	95,816	41,1	58,9	106,5	79,6
1968	170,4	30,124	57,164	87,288	83,151	51,2	48,8	147,1	39,0
1969	121,2	13,135	22,944	36,079	85,095	29,8	70,2	23,6	162,5
1970	134,3	15,812	34,177	49,989	84,287	37,2	62,8	33,4	152,7
1971	150,5	19,908	56,914	76,822	73,701	51,0	49,0	74,5	111,6
1972	137,9	82,676	3,271	85,948	51,997	62,3	37,7	156,8	29,3
1973	178,3	4,672	33,931	38,604	139,697	21,7	78,3	19,6	166,5
1974	137,4	39,893	23,697	63,590	73,831	46,3	53,7	98,6	87,5
1975	142,7	15,726	34,935	50,661	92,001	35,5	64,5	66,7	119,4
1976	165,7	60,952	14,428	75,380	90,342	45,5	54,5	168,0	18,1
1977	179,9	43,375	32,304	75,679	104,194	42,1	57,9	170,8	15,3
1978	183,0	58,547	64,584	123,131	59,886	67,3	32,7	164,7	21,4
1979	171,0	37,624	107,073	144,698	26,265	84,6	15,4	156,9	29,2
1980	146,3	21,618	70,353	91,971	54,359	62,9	37,1	59,2	126,9
1981	132,7	7,796	15,785	23,581	109,123	17,8	82,2	16,1	170,0
1982	143,2	53,673	26,365	80,037	63,148	55,9	44,1	141,4	44,7
1983	181,8	63,679	14,834	78,513	103,299	43,2	56,8	180,1	6,0
1984	200,8	21,259	128,275	149,534	51,303	74,5	25,5	177,2	8,9
1985	164,7	10,155	34,176	44,331	120,343	26,9	73,1	28,2	157,9
Средн.	157,3	37,0	38,5	75,5	81,7	47,9	52,1	110,1	76,0
Мин.	121,2	4,7	3,3	23,6	26,3	17,8	15,4	16,1	6,0
Макс.	200,8	90,5	128,3	149,5	139,7	84,6	82,2	180,1	170,0

* V_{ML} — объем оз. Мерцбахера, $V_{sn1} < Z_{MAX}$ — объем таяния летнего снега ниже Z_{MAX} ; W_{gl} — объем таяния льда под мореной, открытого льда и старого фирна при $Z_{MAX} > Z_{fg}$; Z_{fg} — высота фирновой границы; $W_{run} = V_{sn1} + W_{gl}$; $V_{sn2} > Z_{MAX} = V_{ML} - W_{run}$ — объем таяния летнего снега выше Z_{MAX} ; $F_{gl} (Z_{MAX} - Z_e)$ и $F_{gl} (Z_b - Z_{MAX})$ — площадь ледников в указанных интервалах высоты.

при данных условиях увлажнения (мм/мес.); (36) — формула Магнуса для расчета насыщенного парциального давления водяного пара E_n при данной температуре воздуха; (37) — региональная зависимость парциального давления водяного пара от высоты; (38) — выражение для определения относительной влажности воздуха.

Исследования и контроль различных методов расчета испарения показали [36], что формула Романенко позволяет получать результаты, близкие к данным испарителя. Для вывода формулы (37) использованы наблюдения метеостанций и данные аэрозондирования атмосферы (всего 320 пунктов) на территории Центральной и Высокой Азии, расположенных в интервалах 58,33–118,62° в.д., 30,18–51,12° с.ш. на высоте 360–5583 м над уровнем моря.

Таким образом, рассматриваемый метод включает следующие компоненты:

- уравнения (10, 11) для моделирования сезонного стока от таяния снега и льда в областях аккумуляции и абляции ледников;
- обоснованное выражение (12) для определения интегрального коэффициента стока;
- комплекс расчетных формул для определения осадков, температуры и влажности воздуха, интенсивности таяния льда под мореной, открытого льда и испарения в интервалах высоты $Z_e \div Z_{MAX}$, $Z_{uml} \div Z_{MAX}$, $Z_e \div Z_{fg}$, $Z_{fg} \div Z_{MAX}$, и $Z_{MAX} \div Z_b$ на ледниках.

Перечисленные выше пункты, а также наличие исходной гляциологической и метеорологической информации считаем достаточными для расчета составляющих суммарного стока из области оледенения в бассейне озера Мерцбахера.

ДИНАМИКА ПРИТОКА ВОДЫ В ОЗЕРО МЕРЦБАХЕРА

Наполнение озера Мерцбахера происходит почти исключительно за счет притока талой снеговой и ледниковой воды с площади бассейна, расположенной выше подпруживающей плотины. Поступление воды по поверхности соседнего ледника Южный Иньльчек возможно с весьма ограниченной его площади, примыкающей к плотине (см. рис. 4), и существенно не влияет на наполнение озера. В принципе целесообразно оценить потенциально возможное увеличение объема прорывной волны на пути от концевой части ледника Иньльчек до гидропоста «Устье» (см. рис. 1) за счет боковых притоков реки и поступления поверхностного и грунтового стока со склонов бассейна. Скорее всего, суммарный вклад этих источников окажется незначительным, поскольку, судя по гидрографам стока на гидропосту «Устье», продолжительность прорыва

составляет всего 8–10 дней. Таким образом, предлагаемая автором оценка составляющих притока в озеро Мерцбахера по уравнению

$$V_{ML} = W_{gl} + V_{snow} \quad (39)$$

(где V_{snow} — объем таяния снега на внеледниковой части бассейна озера Мерцбахера) является вполне обоснованной. Для определения объема V_{snow} , учитывая, что независимая оценка составляющих этого уравнения W_{gl} и V_{ML} выполняется с помощью модели ледникового стока и по формуле (5), используем выражение (39) в следующем виде:

$$V_{snow} = V_{ML} - W_{gl}. \quad (40)$$

Результаты расчета V_{ML} , W_{gl} и V_{snow} за 1952–1985 годы представлены в табл. 3, а рис. 9 иллюстрирует временное изменение этих объемов в 1952–1985 годах. Суммарный за июнь–август сток с различных поверхностей в области оледенения рассчитан с учетом ежегодных колебаний Z_{MAX} в каждой из 45 групп ледников. В соответствии с уравнениями (10, 11) в этом стоке выделены объемы таяния льда под мореной, открытого льда и летнего снега. Объем таяния снега в июне–августе на внеледниковой части бассейна озера Мерцбахера определен по уравнению (40). В качестве входных данных при экстраполяции летних осадков в область оледенения по формулам типа (21) использованы наблюдения на метеостанции «Койлю», которая была закрыта после 1987 года. Этим фактом обусловлена длина интервала времени в табл. 3 и на рис. 9. В дальнейшем планируется поиск другого источника информации по температуре воздуха и осадкам — в таких глобальных и региональных базах данных, как CRU, GPCC, UDel, APHRODITE.

В итоге расчета составляющих притока воды в озеро Мерцбахера установлено:

1) вклад таяния сезонного снега во внеледниковой части бассейна несколько превышает поступление воды с площади оледенения, несмотря на то что ее современный размер составляет 57,7% от площади бассейна выше плотины;

2) в среднем за 1952–1985 годы объемы таяния многолетних запасов льда и фирна и таяния летнего снега на площади оледенения оказались почти одинаковыми, хотя их соотношение (см. табл. 3, рис. 9) подвержено значительным колебаниям;

3) временной тренд объема V_{ML} в течение 1930–1997 годов показывает возрастание накопления и сброса воды из оз. Мерцбахера, что согласуется с убывающим трендом суммы осадков за июнь–сентябрь и ростом средней

летней температуры воздуха на метеостанции «Тянь-Шань».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате решения поставленных задач получена следующая новая информация.

Обновлены высотно-площадные параметры оледенения в бассейне озера Мерцбахера по состоянию на 2002 год. Впервые рассчитано изменение объема озера в течение 1930–2005 годов.

Разработана методика определения составляющих притока воды в оз. Мерцбахера, которая включает следующие блоки: модель наполнения озера, экстраполяции температуры воздуха и осадков, интенсивности таяния ледников, средняя толщина моренного покрова и ее пространственное распределение, расчет испарения. В результате расчетов для 1952–1985 годов установлено, что в среднем 47,9% объема озера формируется за счет таяния на ледниках, а остальная вода (52,1%) поступает из внеледниковой части бассейна. Минимальное и максимальное значения этих источников притока воды в озеро составляют соответственно 17,8; 84,6 и 14,8; 82,2%.

2. Исследование, расчеты и прогноз элементов многолетнего режима оз. Мерцбахера и других прорывоопасных озер представляет значительный научный и практический интерес по многим причинам. Перечислим некоторые из них.

Не выяснены причины и механизм прорыва озера при значениях его объема, различающихся между собой в 2,6 раза (см. табл. 1), и колебаниях даты начала прорыва с середины мая до середины октября [24]. По этому поводу высказывались различные качественные гипотезы, однако количественное их подтверждение пока не получено.

Нерешенной остается практически важная задача прогноза даты начала прорыва, хотя уже были получены обнадеживающие результаты [12], основанные на стандартных наблюдениях на метеостанции «Койлю». К сожалению, эта станция давно закрыта, а другие аналогичные пункты наблюдений в бассейне реки Сарыджас отсутствуют.

Не изучены возможности наблюдения за наполнением озера с помощью спутникового и наземного мониторинга. Определенные перспективы в этом направлении открываются в результате совместных гляциологических и геофизических работ специалистов из Австрии, Германии и Киргизии в бассейне ледника Иньльчек [24].

Влияние катастрофических прорывов воды из озера Мерцбахера на гидрографы стока рек Иньльчек, Сарыджас и Аксу необходимо учитывать при освоении природных и гидроэнергетических ресурсов этих бассейнов, по-

сколькx распространение прорывной волны зарегистрировано [33] на расстоянии 150 км от места ее образования.

3. Известно [4, 5], что причиной прорыва гляциогенных озер может быть разрушение плотины вследствие экстремального притока талой воды, а также попадания в озеро лавинных, се-

левых и оползневых масс. Следовательно, наличие озер может как служить основным фактором образования прорывной волны и (или) селя, так и многократно усиливать селевой процесс, разрушивший озерную плотину. В том и в другом случае задачей системы защиты населенных пунктов и со-

циальной инфраструктуры является оценка объема прорывной волны при разрушении плотины одного или нескольких вышерасположенных гляциогенных озер (эти сведения для оз. Мерцбахера получены путем применения изложенных выше методов и приведены в табл. 1, 3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсюк Г.А. Ледник Иныльчек // Победенные вершины: Ежегодник советского альпинизма. М., 1952. С. 27–90.
2. Айрапетьянц С.Э., Баков Е.К. Морфология ледникового озера Мерцбахера и механизм его катастрофических прорывов // Некоторые закономерности оледенения Тянь-Шаня. Фрунзе, 1971. С. 75–84.
3. Боровикова Л.Н., Денисов Ю.М., Трофимова Е.Б., Шенцис И.Д. Математическое моделирование процесса стока горных рек // Труды САНИГМИ. 1972. Вып. 61 (76). С. 150.
4. Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 155 с.
5. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 144 с.
6. Глазырин Г.Е., Казан А.Г. Расчет гидрологических характеристик прорыва озера Мерцбахера // Труды САНИГМИ Госкомгидромета. 1986. Вып. 111 (192). С. 36–43.
7. Глазырин Г.Е., Соколов Л.Н. Возможность прогноза характеристик паводков, вызываемых прорывами ледниковых озер // Материалы гляциологических исследований. М., 1976. Вып. 26. С. 78–85.
8. Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 248 с.
9. Диких А.Н., Кузьмиченко В.А. Озеро Мерцбахера // Вестник КРСУ. Бишкек, 2003. № 2. С. 1–7.
10. Каталог ледников СССР. Т. 14. Вып. 2. Ч. 9. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 64 с.
11. Коновалов В.Г. Каталогизация горных ледников и генерализация их распределения по материалам дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Изд-во ИКИ РАН, 2010. Т. 7. № 2. С. 43–54.
12. Коновалов В.Г. Метод расчета и прогноза элементов режима прорывоопасного озера Мерцбахера // Материалы гляциологических исследований. М., 1990. Вып. 69. С. 141–147.
13. Коновалов В.Г. Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху. Т. 1. Гл. 5. Изменения климата и формирование стока с ледников. М.: Наука, 2006. 488 с.
14. Коновалов В.Г. Пространственная экстраполяция и изменчивость характеристик климата на территории Центральной Азии // Известия РАН. Сер. Географ. 2003. № 5. С. 97–106.
15. Коновалов В.Г. Таяние и сток с ледников в бассейнах рек Средней Азии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 238 с.
16. Коновалов В.Г., Прохоренко С.И. Гидрологический режим оледенения в бассейне р. Сарыджаз // Труды САНИГМИ. 1991. Вып. 140 (221). С. 126–137.
17. Кузьмиченко В.А. К вопросу об обработке материалов топографических съемок дна гляциальных озер // Гляциологические исследования в Центральном Тянь-Шане. Фрунзе, 1984. С. 130–137.
18. Рацек В.И. Оледенение массива пика Победы // Географический сборник. Вып. 4: Гляциология. 1954. С. 59–81.
19. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 14. Вып. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 347 с.
20. Романенко В.А. Расчет влажности почвы на основе универсальных зависимостей для больших территорий // Труды Украинского НИИ гидрометеорологии. Киев, 1961. Вып. 3. С. 25–32.
21. Справочник по климату СССР. Вып. 32. Ч. 4. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 290 с.
22. Bodo B.A. Monthly discharges for 2400 rivers and streams of the former Soviet Union (FSU). V. 1.0. Toronto, Canada, 2000.
23. Dyurgerov M.B. Glacier mass balance and regime: data of measurements and analysis. Occasional paper № 55. INSTAAR, University of Colorado, 2002. URL: http://instaar.colorado.edu/other/occ_papers.html.
24. Glazirin G.E. A century of investigations on outbursts of the ice-dammed lake Metzbacher (Central Tien Shan) // Austrian Journal of Earth Sciences, 2010. V. 103. № 2. P. 171–179.
25. Iturrizaga L. Glacier lake outburst floods. Göttingen, Germany: Institute of Geography, University of Göttingen, 2010. 41 p.
26. Ives J.D., Shrestha R.B., Mool P.K. Formation of glacial lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF risk assessment. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu ICIMOD, 2010. 57 p.
27. Konovalov V.G. Computations of melting under moraine as a part of regional modeling of glacier runoff // Proceedings of a workshop «Debris-Covered Glaciers», Seattle, Washington, USA, September 2000. IAHS Publication № 264, 2000. P. 109–118.
28. Konovalov V.G. Methods for computations of onset date and daily hydrograph of the outburst from Merzbacher Lake, Inylchek Glacier Tien-Shan // Proceedings of the International Conference «Hydrology in Mountain Regions». Lausanne, Switzerland, 27.08.1990–01.09.1990. IAHS Publication № 193, 1990. P. 181–188.
29. Mool P.K., Bajracharya S.R. Tista Basin, Sikkim Himalaya inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan Region. Kathmandu, Nepal: ICIMOD, 2003. 145 p.
30. Mool P.K., Bajracharya S.R., Joshi S.P., Shaky K., Baidya A. Inventory of glaciers and glacial lakes, glaciers outburst floods monitoring and early warning system in the Hindukush-Himalayan Region Nepal. Kathmandu, Nepal: ICIMOD, 2001. 280 p.
31. Mool P.K., Bajracharya S.R., Kunzang K., Gurung D.R., Joshi S.P., Shaky K. Inventory of glaciers and glacial lakes, glaciers outburst floods monitoring and early warning system in the Hindukush-Himalayan Region Bhutan. Kathmandu, Nepal: ICIMOD, 2001. 210 p.
32. Mool P.K., Bajracharya S.R., Roohi R., Ashraf A., Hussain S.A. Upper Indus, Jhelum, Shingo, Shyok, and Shigar River basins Pakistan Himalaya inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan Region. Kathmandu, Nepal: ICIMOD, 2004. 354 p.
33. Ng F., Liu S., Mavlyudov B., Wang Y. Climatic control on the peak discharge of glacier outburst floods // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. L21503. doi:10.1029/2007GL031426.
34. Petrakov D.A., Krylenko I.V., Chernomorets S.S., Tutubalina O.V., Krylenko I.N., Shakhmina M.S. Debris flow hazard of glacial lakes in the Central Caucasus / Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Netherlands: Millpress, 2007. ISBN 978 90 5966 059 5.
35. Williams M.W., Konovalov V.G. Central Asia temperature and precipitation data, 1879–2003. Boulder, Colorado: USA National Snow and Ice Data Center, 2008. URL: http://nsidc.org/data/docs/noaa/g02174_central_asia_data/index.html.
36. Xu C.-Y., Singh V.P. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods // Hydrological Processes. 1998. V. 12. P. 429–442.