

Об определении гидрогеофизических характеристик прорывоопасных водных объектов

*К.Н. Анахаев^{1,2)}**, *В.В. Беликов¹⁾***, *А.С. Бестужева³⁾****, *Х.К. Анахаева⁴⁾*****

¹⁾Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (ИПМА КБНЦ РАН), Россия, КБР, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89а; **anaha13@mail.ru*

²⁾Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН), Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; ***belvv@bk.ru*

³⁾Научно-исследовательский университет «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ****alex_bestu@mail.ru*

⁴⁾Российский университет транспорта (РУТ-МИИТ), Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; *****mr.halimat@mail.ru*

*Адрес для переписки: *anaha13@mail.ru*

Реферат. Работа посвящена изучению условий возникновения и развития горных прорывоопасных водных объектов – приледниковых озер и запрудных водоемов, прорывы которых представляют угрозу безопасности жизнедеятельности нижерасположенных районов. При этом, одним из важных вопросов является определение гидрогеофизических характеристик водоемов, необходимых для создания математических моделей водоема, оперативного прогноза развития и риска его прорыва в чрезвычайных ситуациях и др. Показано, что главнейшим и наиболее трудноопределяемым параметром водоемов является объем, принятое значение которого должно иметь соответствующее обоснование с указанием способа определения и допущений.

Предложена новая методика определения объема водоемов на основе известных значений площади поверхности, максимальной глубины и глубин в 4 точках продольного и поперечного сечений (в том числе, по данным дистанционных измерений). Получены расчетные зависимости для определения текущих и полных значений площади поверхности, объема и средней глубины водоема (в том числе, при наличии верхового клина подпорной плотины) с комплексным учетом различных форм очертаний склонов котловины (прямолинейных, выпуклых, вогнутых). Сравнения подсчитанных результатов с фактическими объемами по картам изобат озер Сылтран-кель, Донгуз-Орун-кель, Азау дало достаточно близкое совпадение (+4.3, -9.2, -2.4%), построены батиграфические и объемные кривые, а также кривые средних глубин озер. Выполнен пример сравнительного подсчета объема верхового клина завальной плотины при разных заложениях. Для частных случаев полученные зависимости совпадают с точными формулами для объемов цилиндра, конуса, пирамиды, клина. Предложенная методика напрямую применима также и для определения объемов холмов, бугров, отвалов, островов, айсбергов и др.

Ключевые слова. Приледниковые озера, запрудные водоемы, объем и средняя глубина водоема, площадь водной поверхности, изобаты, батиграфическая кривая, объемная кривая.

On the identification of hydrogeophysical characteristics for the breakthrough water bodies

*K.N. Anakhaev^{1,2)}**, *V.V. Belikov¹⁾***, *A.S. Bestusheva³⁾****, *H.K. Anakhaeva⁴⁾*****

¹⁾Institute of applied mathematics and automation of the Kabardino-Balkarian scientific center of the Russian Academy of Sciences (IPMA KBNC RAS),
89a, Shortanov St., 360000, Nalchik, KBR, Russian Federation; **anaha13@mail.ru*

²⁾Institute of water problems of the Russian Academy of Sciences (IVP RAS),
3, Gubkin Str., 119333, Moscow, Russian Federation; ***belvv@bk.ru*

³⁾Moscow State University of Civil Engineering, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering,
26, Yaroslavskoe highway, 129337, Moscow, Russian Federation; ****alex_bestu@mail.ru*

⁴⁾Russian university of transport (RUT-MIIT),
2, 9 str., Obozrova Str., 127984, Moscow, Russian Federation; *****mr.halimat@mail.ru*

*Correspondence address: *anaha13@mail.ru*

Abstract. The work is devoted to the study of the conditions for the emergence and development of mountain breakthrough-hazardous water bodies - glacial lakes and dam reservoirs, the breakthroughs of which pose a threat to the life safety of the lower regions. At the same time, one of the important questions is the determination of the hydrogeophysical characteristics of reservoirs necessary to create mathematical models of the reservoir, operational forecast of development and the risk of its breakthrough in emergency situations, etc. It is shown that the most important and most difficult to determine parameter of water bodies is the volume, the accepted value of which should have an appropriate justification with indication of the method of determination and assumptions.

A new method is proposed for determining the volume of water bodies based on known values of surface area, maximum depth and depths at 4 points of longitudinal and cross sections (including, according to remote measurements). Design dependencies were obtained to determine the current and full values of the surface area, volume and average depth of the reservoir (including, in the presence of an upper wedge of the retaining dam) with complex consideration of various shapes of the contours of the slopes of the basin (rectilinear, convex, concave). Comparison of the calculated results with the actual volumes from the isobat maps of the Syltran-kel, Donguz-Orun-kel, Azau lakes gave a fairly close match (+4.3, -9.2, -2.4%), bathygraphic and volume curves were built, as well as curves of the average depths of the lakes. An example of a comparative calculation of the volume of a top wedge of a blocky dam at different laying was made. For particular cases, the resulting constraints coincide with the exact formulas for volumes of cylinder, cone, pyramid, wedge. The proposed method is also directly applicable for determining the volumes of hills, hillocks, dumps, islands, icebergs, etc.

Keywords. Glacial lakes, dam water bodies, water body volume and average depth, water surface area, isobaths, bathygraphic curve, volume curve.

На горных и предгорных территориях в результате естественного развития природно-климатических, гидрогеофизических и склоновых процессов нередко возникают прорывоопасные водные объекты – приледниковые (моренные) озера и завальные водоемы, характеризующиеся текущим жизненным циклом: зарождение, развитие, деградация (прорывы) и исчезновение.

Приледниковые озера образуются в концевой (языковой) части ледников как при наступании, так и отступании последних (Schweizer, 1957; Виноградов, 1977; Яблоков, 2009; Ефремов и др., 2010; Тавасиев, Тебиева, 2013) – источниками их питания служат поверхностные, подземные и внутрILEDниковые воды, образующиеся при таянии льда и снежников на поверхности ледника и береговых склонах.

Завальные водоемы образуются в результате обвалов и оползней береговых склонов с перекрытием всего створа ущелья и последующей аккумуляции в русле речных расходов воды с верховой стороны от запрудной плотины. Причинами оползаний береговых склонов, как правило, являются переувлажнение неустойчивых грунтовых массивов (при обильных дождевых осадках, таянии снега, фильтрационном насыщении), подмыв русла в основании склона паводковыми и селевыми потоками, сейсмические воздействия (Тукеев, 2002; Виноградов, Виноградова, 2008; Яблоков, 2009; Хуан, Ли, 2010; Анахаев, 2022).

Примерами крупнейших завальных плотин являются: – обвал горы Хату-Пир в ущелье р. Инд в 1841 г. с образованием озера длиной 56 км (прорвалось через полгода) (Виноградов, Виноградова, 2008); – оползневая плотина Гхона высотой 350 м в бассейне Ганга в 1893 г. с образованием озера площадью 10 км² (прорвалось через год) (Виноградов, Виноградова, 2008); – Усойский завал (по названию погребенного кишлака) 1911 года в Таджикистане на р. Бартаг (Мургаб) объемом ~ 2.2 км³, высотой более 500 м и шириной более 3 км, образовавший Сарезкое озеро (по названию затопленного кишлака) площадью ~ 88 км² и объемом ~ 16.8 км³ (Акулов, 1948; Тукеев, 2002) и др.

Разрушения приледниковых озер и завальных водоемов сопровождаются, как правило, возникновением мощных селевых и наносоводных потоков, весьма опасных для жизнедеятельности нижерасположенных населенных (селитебных) территорий, объектов экономики, инженерных сетей и коммуникаций (Виноградов, 1977; Мочалов, Цукерман, 1982; Тукеев, 2002; Яблоков, 2009; Тавасиев, Тебиева, 2013). Например, прорыв приледникового озера Laguna Cochup с моренной перемычкой («Тур Cochup») привел к уничтожению трети города Huaras (Перу) и гибели около 6 тысяч человек (Schweizer, 1957).

В постсоветском пространстве территория Таджикистана является наиболее селеопасной, здесь сходят наиболее мощные и разрушительные сели, в том числе, в результате прорывов приледниковых озер и завальных

водоемов, располагаемых на высотах до 4000-4500 м и более (Яблоков, 2009). Только в апреле 1998 года селевыми потоками были повреждены более 8 тысяч жилых домов, разрушены более 200 мостов и около 1000 км автодорог, инженерных сетей, погибло множество скота и, самое трагичное, погибли 115 человек. При этом, многие прорывоопасные водные объекты практически недоступны для обследования, поэтому в настоящее время разработка прогнозных критериев возможности их прорыва является наиболее актуальной проблемой селезащиты.

В этой связи, следует отметить, что риски, представляемые прорывоопасными водными объектами Центрального Кавказа, в том числе приледниковыми озерами, изучены в недостаточно полной мере (Ефремов и др., 2010; Тавасиев, Тебиева, 2013), в особенности, с учетом динамики непрерывных изменений их размеров и глубин. Прорывы аккумулярованных водных масс сложно спрогнозировать, поскольку они зависят от множества факторов (климатических, геофизических, гидрологических, геоморфологических и др.) в недостаточно полной мере определенных и конкретизированных для отдельно рассматриваемых объектов (Schweizer, 1957; Виноградов, 1977). Поэтому, изучение характера развития и определение гидрогеофизических параметров прорывоопасных водных объектов при потенциальной возможности их прорыва имеет безусловную актуальность как с точки зрения оценки их безопасности, так и прогноза возможных негативных последствий.

Наиболее распространенной и частой причиной прорыва водных объектов на горных территориях являются перелив потока воды через гребни подпорных перемычек, а также прорывы тела перемычек в результате развития внутренних термо-эрозионных разрушительных процессов, всплытия подпорных ледников (Виноградов, 1977; Тавасиев, Тебиева, 2013).

При этом, приледниковые озера в зависимости от их гидрогеофизических и геоморфологических особенностей можно классифицировать по отношению к леднику (Свирепов, 2020), как: супергляциальное – озеро на леднике, прогляциальное – одна из сторон озера подпирается ледником, перигляциальное – озеро расположено на некотором удалении (≤ 2 км) от ледника, экстрарогляциальное – озеро не имеет ледникового питания и расположено на значительном удалении (> 2 км). При этом, озера могут располагаться (Schweizer, 1957; Виноградов, 1977; Тавасиев, Тебиева, 2013 и др.): – на поверхности ледника; – внутри ледника; – в боковых долинах, подпруженных ледником основной долины; – между ледником и бортом долины при наступании ледника (озеро Башкара в верховье р. Аддылсу); – между конечной мореной и телом ледника (западные (Анисимов, 2014), озера Микель-Чиран в верховье р. Малка, Азау в верховье р. Азау (Сейнова, Золотарев, 2001; Богаченко и др., 2008)); – между скальным ригелем и ледником (озера Сылтранкель в верховье р. Кыртык, Озерный кар в верховье р. Адырсу, Хупшара в верховье р. Урух) (Сейнова, Золотарев, 2001; Богаченко и др., 2008; Тавасиев, Тебиева, 2013, с. 120); – в основной долине, подпруженной ледником боковой долины (при отступании ледника основной долины); – между береговой мореной и склоном долины (озеро Донгуз-Орун-кель в верховье р. Донгуз-

Орун); – в ущельях и долинах, запруженных лавинами, оползнями, обвалами (Мочалов, Цукерман, 1982; Богаченко и др., 2008; Ефремов и др., 2010).

В приледниковых озерах и завальных водоемах подпорные перемычки состоят, как правило, из моренных (талых, мерзлых) грунтов, ледникового тела, лавинных отложений, рыхлообломочных и связных грунтов обвального оползневого массива.

По степени прорывоопасности приледниковые озера делят на основные три типа (Богаченко и др., 2008 и др.):

- потенциально неопасные – озера, подпруженные устойчивым скальным ригелем (озера Сылтран-кель, Озерный кар);
- потенциально слабоопасные – озера, подпруженные устойчивой мореной без погребенного льда (озеро Донгуз-Орун-кель);
- потенциально опасные – озера, подпруженные легкоразмываемой мореной или мореной с погребенным льдом (озера Башкара, Азау, Микель-Чиран).

Следует также отметить наличие сезонно исчезающих ледниковых озер с резко изменяющимся уровнем воды – они наполняются в период интенсивного таяния ледника и практически полностью опорожняются (вследствие фильтрации) к осенне-зимнему периоду (озеро Куру в верховье правого притока р. Булунгу-суу, зандровое ниже оз. Башкара, Озерный кар) (Акулов, 1948, с. 120-121, Анахаев, 2003). В таких озерах, имеющих значительные площадь и глубину, в летнее время могут накапливаться достаточно большие объемы воды – например, приледниковое озеро Куру летом 2002 г. имело площадь 30-40 тыс. м² и глубину до 30 м и более при объеме более 600 тыс. м³ (Анахаев, 2003). При этом, уровень воды в озере поднимался до уровня отметок на 1.5-2.0 м ниже гребня перемычки с «мертвым» погребенным льдом – в подобных условиях возникает опасность прорыва озер как при переливах воды через гребень перемычки, так и в результате развития термо-карстовых процессов и всплывания ледника (Виноградов, 1977; Тавасиев, Тебиева, 2013).

Наибольшую опасность представляют озера, подпруженные легкоразмываемой мореной, при этом одним из необходимых условий прорывоопасности озера является наличие в нем достаточного объема воды – не менее 20-25 тыс. м³ (Богаченко и др., 2008).

В связи с вышеизложенным, в рамках изучения гидрогеофизических характеристик прорывоопасных водных объектов необходимо выделить и классифицировать основные их расчетные схемы по формам их поверхности, поперечных и продольных сечений котловины, видам подпорных перемычек и условиям функционирования.

При этом следует уделить особое внимание разработке методов оперативного и дистанционного определения их характеристик (Коновалов, 2008; Хуан, Ли, 2010; Кочков, Рянжин, 2016; Свирепов, 2020; Анахаев, 2022), и, в первую очередь, нахождения их объемов (максимального, минимального, резервного), что необходимо для оценки:

- негативных последствий при их разрушениях для нижерасположенных районов;
- максимальных параметров прорывного паводкового и селевого потоков;
- динамики возрастания объемов прорывоопасных водных масс;
- опасности каскадного разрушения водных объектов в нижнем течении;
- объемного резерва для принятия дополнительного стока (при авариях вышерасположенных водных объектов, катастрофических ливневых осадках и др.);
- имеющихся запасов водных ресурсов, в том числе в ледниковой зоне;
- возможностей водоподпитки речных русел в маловодные периоды года.

В частности, о возможных масштабах чрезвычайных ситуаций, связанных с возникновением завальных водоемов, свидетельствуют следующие примеры:

– в русло р. Зеравшан (Таджикистан) 24.04.1964 г. сошел гигантский оползень (объемом ~ 20 млн м³), образовав завальную плотину высотой ~150 м, за которой начал интенсивно аккумулироваться речной сток (> 70 млн м³) (Яблоков, 2009). Перелив через гребень плотины с последующим ее разрушением грозил масштабными бедствиями для нижерасположенных районов Таджикистана и Узбекистана. На аварийно-спасательные работы были привлечены более 36 тыс. человек и множество техники (250 бульдозеров, 50 экскаваторов, 500 самосвалов и др.) и в результате напряженной круглосуточной работы в течении 10 суток удалось пробить сбросной канал для опорожнения озера, что предотвратило надвигавшуюся катастрофу;

– в провинции Сычуань (Китай) землетрясение 12.05.2008 г. привело к образованию более 50 тысяч опасных склоновых процессов (оползни и обвалы, селевые потоки, завальные водоемы и др.), только под двумя наиболее крупными оползнями погибло около 3 тысяч человек (Хуан, Ли, 2010). В этой ситуации одним из главных вопросов обеспечения безопасности жизнедеятельности было регистрация и отслеживание развития параметров завальных водоемов, в особенности, в труднодоступных районах, каскадное разрушение которых угрожало резким усугублением ситуации.

Указанные примеры наглядно показывают, насколько важным и актуальным вопросом является разработка методов оперативного и дистанционного получения данных по завальным плотинам, в первую очередь, по их объемам как для оценки опасности их прорыва, так и резервному времени их заполнения водой.

В дальнейшем, с целью упрощения текста статьи, при рассмотрении как приледниковых озер, так и завальных и запрудных водоемов будет по преимуществу использоваться обобщенный термин «водоемы».

Как известно, наиболее точным методом определения объема водоема *V* является графоаналитический на основе использования топографической карты с горизонталями (изобатами) ложа водоема (рис.1; 3; 5) по зависимо-

сти (Богословский, 1960; Муравейский, 1960b; Кодяев, 1973; Рекомендации Р 52.08.874-2018 ..., 2018)

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{f_i + f_{i+1}}{2} \Delta h, \quad (1)$$

где f_i и f_{i+1} – площади поверхностей, очерченных соседними горизонталями, проведенными через Δh (по высоте); n – число рассматриваемых поверхностей. При этом величина объема в самом нижнем слое i_{0-1} находится по формуле $V_{0-1} = f_i \Delta h / 3$. (Рекомендации Р 52.08.874-2018 ..., 2018).

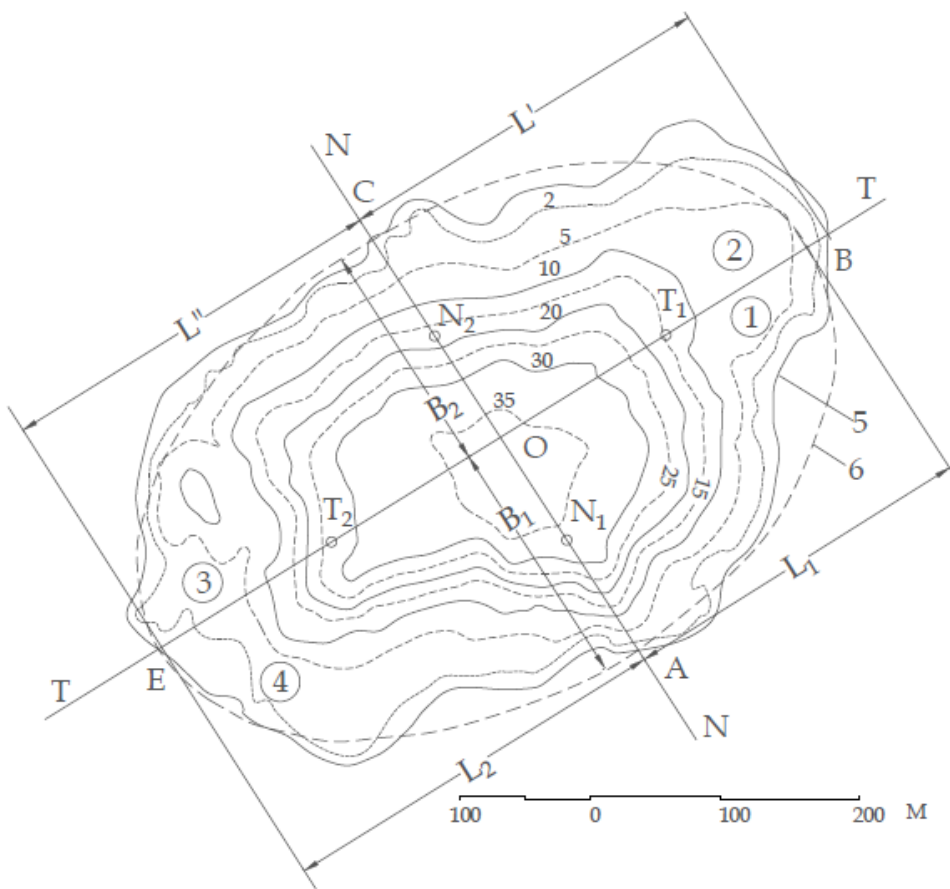


Рисунок 1. Карта в изобатах котловины озера Сылтран-кель

1-4 – четыре модельные четверть-эллиптические зоны разделения поверхности озера, соответственно – АОВ, ВОС, СОЕ, ЕОА; 5 и 6 – реальная и расчетная (равновеликая) очертания поверхности озера

Figure 1. Map in the isobaths of the basin of Lake Syltran-kel

1-4 - four model quarter-elliptical zones of separation of the lake surface, respectively – АОВ, ВОС, СОЕ, ЕОА; 5 and 6 - real and calculated (equal) outlines of the lake surface

Результаты выполненного расчета чаще всего представляют в виде графиков батиграфической $f(h)$ и объемной $V(h)$ характеристик водоемов (Богословский, 1960; Муравейский, 1960b; Кодяев, 1973) (рис. 2в; 4в; 6в), где h – глубина воды над наименьшей точкой емкости водоема.

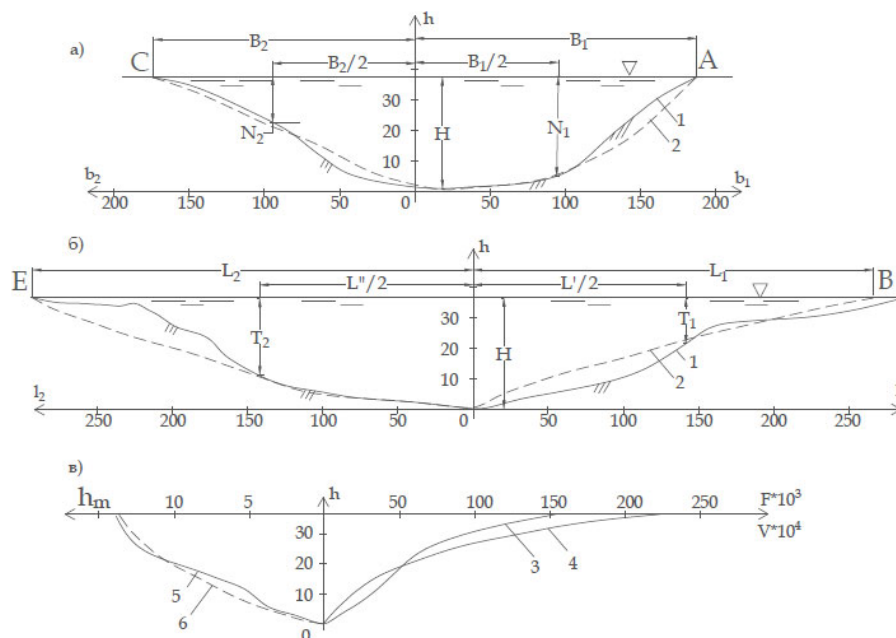


Рисунок 2. Озеро Сылтран-кель: а) поперечное сечение AOC ; б) продольное сечение BOE ; в) гидрофизические характеристики озера. 1 и 2 – реальные и модельные (расчетные) очертания котловины озера; 3 и 4 – батиграфические и объемные кривые озера; 5 и 6 – фактическая и расчетная кривые текущих значений средних глубин озера

Figure 2. Lake Syltran-kel: a) cross-section AOC ; b) longitudinal section BOE ; c) hydrophysical characteristics of the lake. 1 and 2 – real and model (design) outlines of the lake basin; 3 and 4 are bathymetric and volumetric curves of the lake; 5 and 6 are actual and calculated curves of the current values of the average depths of the lake

При отсутствии батиграфической съемки ложа водоема (имеющей максимальную глубину H) для нахождения его объема используют различные приближенные аналитические зависимости, как правило, недостаточно полно учитывающие их геоморфологию (в плане и сечениях), такие как:

- формулы одномерной зависимости объема от максимальной площади F поверхности (зеркала) водоема $V = f(F)$ (Коновалов, 2008), в том числе для западинного и термокарстового озер (Анисимов, 2014):

$$V = 0.055 \cdot F^{1.5}; \quad V = 0.1 \cdot F^{1.5}; \quad (2)$$

- формула объема вертикального цилиндра (Муравейский, 1960b; Мочалов, Цукерман, 1982; Коновалов, 2008; Свирепов, 2020)

$$V = FH; \quad (3)$$

- формула объема перевернутого конуса (Муравейский, 1960b; Рекомендации Р 52.08.874-2018 ..., 2018)

$$V = FH / 3 ; \quad (4)$$

- формула горизонтальной пирамиды с прямоугольным поперечным сечением (Сулейманов, Рагимова, 2008);
- формула горизонтального клина с трапецидальным основанием (Анахаев, 2022);
- формулы для подпруженного ледником и завального озер (Анисимов, 2014):

$$V = 0.2 \cdot FH \quad ; \quad V = 0.25 \cdot FH \quad ; \quad (5)$$

- формулы для западного и термокарстового озер (Керемкулов, 1985)

$$V = 0.20 \cdot F^{0.54} H^{2.04} \quad ; \quad V = 0.09 \cdot F^{0.10} H^{2.48} \quad ; \quad (6)$$

- формула усеченного конуса (пирамиды) (Богословский, 1960; Муравейский, 1960b; Кодяев, 1973; Бронштейн, Семендяев, 1980; Виноградов, 2008)

$$V = (F + f_0 + \sqrt{F \cdot f_0}) \cdot H / 3 , \quad (7)$$

где f_0 площадь дна водоема;

- формула определения объема водоема по его средней глубине h_m (Коновалов, 2008, Рекомендации Р 52.08.874-2018 ..., 2018)

$$V = f(h_m, F) ; \quad (8)$$

- формула полуэллипсоида с параметрами, полученными на основе статистической обработки данных большого числа (более тысячи) озер (Кочков, Рянжин, 2016).

Результаты расчета по вышеприведенным формулам могут существенно (до 60-70% и более) отличаться от действительных значений по причине неучета ими реальной геоморфологии котловин водоемов (в том числе вогнутости и выпуклости бортов котловин (Муравейский, 1960b, с. 212)). Более того, в формулах (2), (6) (Керемкулов, 1985; Коновалов, 2008; Анисимов, 2014) не выдерживается соответствие единиц измерения.

В отношении же формулы (8) по определению объема водоема в зависимости от значения средней глубины водоема h_m следует отметить ее неверную постановку и логическую неопределенность, поскольку величина h_m является вычисляемой величиной (Верещагин, 1930, с. 98) и не может быть использована в качестве непосредственного исходного параметра, так как само ее значение (практически) находится только по уже известному значению объема водоема, как отношение последнего к максимальной площади поверхности (зеркала) водоема (Верещагин, 1930; Богословский, 1960; Муравейский, 1960a, 1960b; Чеботарев, 1978; Рекомендации Р 52.08.874-2018 ..., 2018)

$$h_m = V / F \quad , \quad (9)$$

в котором V – известный объем водоема, подсчитанный на основе имею-

щейся карты изобат чаши водоема, цифровой модели и др.

При этом, следует отметить, что предложенный Верещагиным Г.Ю. (Верещагин, 1930, с. 68) морфометрический показатель емкости формы котловины в виде относительной средней глубины водоема, равный (Муравейский, 1960а, 1960б; Керемкулов, 1985; Зимницкий, 2005; Зимницкий, Николайчук, 2006; Коновалов, 2008; Ефремов и др., 2010)

$$c_1 = h_m / H \quad (10)$$

позволяет сопоставить полноту объема котловины водоема с объемами тел вращения (Муравейский, 1960а): вертикального цилиндра – 1.0; полуэллипсоида (полушария) – 0.67; эллиптического параболоида (а также прямоугольного нерасширяющегося клина) – 0.50; перевернутого конуса (также пирамиды) – 0.33.

Для характеристики же котловин водоемов сложной формы (с оценкой их уклонения от форм фигур вращения) Муравейским С.Д. (Богословский, 1960; Муравейский, 1960а) предложен показатель формы котловины c , равный отношению средней глубины h_m глубине положения центра тяжести водной массы водоема S_0 , в виде $c = h_m / S_0$.

Как следует из вышеизложенного, важнейшей гидрогеофизической характеристикой водоемов является их объем, а потому весьма актуальной проблемой до настоящего времени остается необходимость контроля достоверности и обоснованности (методы, допущения) определения объемов водоемов, в том числе в (Зимницкий, Николайчук, 2006; Богаченко и др., 2008; Коновалов, 2008; Ефремов и др., 2010; Кидяева и др., 2013; Свирепов, 2020 и др.). Отсутствие приемлемого ответа на этот вопрос ставит под сомнение не только представленные значения объемов (и средних глубин) водоемов, но и итоговые результаты, полученные на их основе. Более того, в ряде случаев (Богаченко и др., 2008; Зимницкий, 2005, с. 39; Зимницкий, Николайчук, 2006 и др.) значения средней глубины водоема h_m не соответствуют основной зависимости (9), что не имеет логического объяснения и свидетельствует о сомнительности исходных данных.

Приводимые (в различных источниках) значения объемов и площадей поверхности водоемов обязательно должны быть обоснованы соответствующими картами изобат водоемов, цифровыми моделями и др. (с указанием даты или/и отметки уровня водоема). При отсутствии же таковых, должны быть пояснены методики, используемые для аналитического определения значений объемов, а также исходные параметры, принятые формы планового и профильных очертаний котловины водоема и т.д.

Ниже излагается новая методика оперативного определения гидрогеофизических параметров водных объектов (объемов, площадей поверхности, поперечных и продольных очертаний, средних глубин и др.) для различных геоморфологических расчетных схем и условий их работы, базирующаяся на доступных исходных данных, а также на результатах дистанционных измерений (GPS –данных, съемок БПЛА, космоснимков и др.).

Учитывая, что береговые линии природных водных объектов представлены изрезанными, неровными и изгибающимися кривыми, ниже они приводятся к расчетным равновеликим (по площади) очертаниям правильных геометрических форм (эллипсу (Кочков, Рянжин, 2016), кругу (Верещагин, 1930), треугольнику).

По плановому очертанию приледниковые озера и завальные водоемы можно разделить на два основных вида – овальной и треугольной форм. К расчетным схемам с овальной формой могут быть отнесены водные объекты, большая часть поверхности которых может быть аппроксимирована равновеликой (полу)эллиптической или (полу)круговой формами, а к схемам треугольной формы – водоемы, формирующиеся в узких ущельях и балках (Schweizer, 1957; Тавасиев, Тебиева, 2013). Предлагаемая методика позволяет также рассматривать объекты со сложной овально-треугольной плановой формой водной поверхности, причем с учетом как симметричных, так и несимметричных поперечных профилей береговых склонов котловины, а также при наличии верхового клина тела завальной плотины.

1. Сезонно исчезающие водные объекты

К таким объектам относятся приледниковые (моренные) озера, наполняемые в весенне-летний период интенсивного таяния снежников и льда, в которых к осенне-зимнему периоду снижается уровень воды до полного опорожнения за счет фильтрационных утечек в моренные грунты и снижения притока талой воды. Для таких случаев, а также для высыхающих озер (Ефремов и др., 2010, с. 45), наиболее достоверные данные об их емкости можно получить на основе инструментальных исследований их ложа при сухом состоянии (сканированием, геодезической и GPS- съемкой и др.). На основе топографической карты с горизонталями (изобатами) (рис. 1) определяются геоморфологические характеристики ложа водоема, при этом значение объема водоема V находится по зависимости (1) (Богословский, 1960; Муравейский, 1960b; Кодяев, 1973; Рекомендации Р 52.08.874-2018 ..., 2018). Указанный способ позволяет построить наиболее точные графики объемной $V(h)$ и батиграфической $F(h)$ кривых водоемов.

Аналогичным образом можно также посчитать емкости вновь построенных водных объектов различного назначения (водохранилищ, селехранилищ, резервных водоемов, польдеров) до их заполнения, а также объектов промышленной гидротехники (хвостохранилищ, шламохранилищ, накопителей и др.).

2. Водные объекты: приледниковые озера и завальные водоемы

Предлагаемая методика определения емкости водных объектов (с указанием даты и/или отметки уровня) в общем случае включает следующие разделы:

а) На основе анализа (по карте, аэрокосмоснимкам и др.) плановой формы водного объекта и известного (предполагаемого) места максимальной

глубины H проводятся продольная $T-T$ и поперечная $N-N$ линии, разделяющие всю водную поверхность на 4 зоны – 1, 2, 3, 4 (по квадрантам IV, I, II, III) с центром O в наиболее глубоком месте водоема (рис. 1; 3; 5).

б) Определяются (в масштабе) длины участков $OA=B_1$, $OC=B_2$, $OB=L'$, $OD=L''$, затем в серединах этих участков фиксируются глубины, соответственно, N_1 , N_2 , T_1 , T_2 . Значения указанных глубин в этих точках предполагаются известными – измеренными с карты изобат, с лодки лотом (эхолотом), со льда в зимний период, с берега с помощью плавучей рамы (Муравейский, 1960с, с. 134).

в) По карте подсчитываются (планиметром, графоаналитически, палеткой, спецпрограммой на ЭВМ и др.) площади водной поверхности в каждой зоне F_1 , F_2 , F_3 , F_4 . В зависимости от вида и конфигураций объединенных участков $ABC = F_{12} = F_1 + F_2$ и $CEA = F_{34} = F_3 + F_4$ выбираются равновеликие формы (полуэллипса и/или треугольника), затем, приравнивая фактические площади F_{12} , F_{34} к площадям принятых «правильных» фигур, находятся расчетные величины расстояний L_1 и L_2 (вместо исходных значений L' и L'').

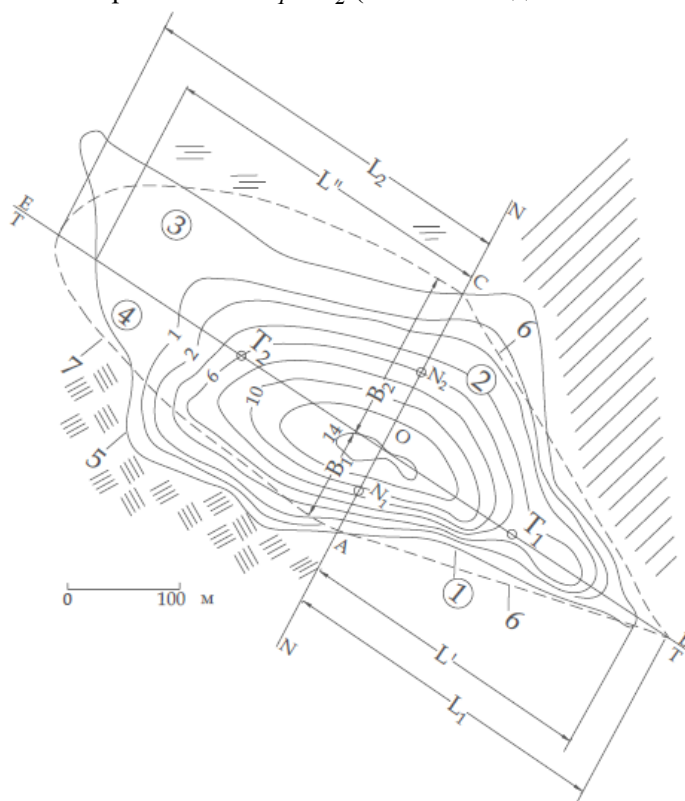


Рисунок 3. Карта в изобатах котловины озера Донгуз-Орун-кель

1, 2 и 3, 4 – модельные зоны – две треугольные и две четверть-эллиптические (AOB , BOC и COE , EOA); 5 – реальное очертание поверхности озера; 6 и 7 – очертания расчетных (равновеликих) зон, соответственно, треугольных AOB , BOC и четверть-эллиптических COE , EOA

Figure 3. Map in the isobaths of the basin of Lake Donguz-Orun-kel

1, 2 and 3, 4 – model zones – two triangular and two quarter-elliptical (AOB , BOC and COE , EOA); 5 – is the actual outline of the lake surface; 6 and 7 – outlines of calculated (equal-sized) zones, respectively, triangular AOB , BOC and quarter-elliptical COE , EOA

г) На основе указанных исходных данных используются полученные расчетные зависимости по определению объемов водоемов различной формы с учетом кривизны и несимметричности береговых склонов котловины. При этом, в рассматриваемых зонах 1-4 могут быть представлены как 4 различных четверть-эллипсов, так и комбинации их и треугольников.

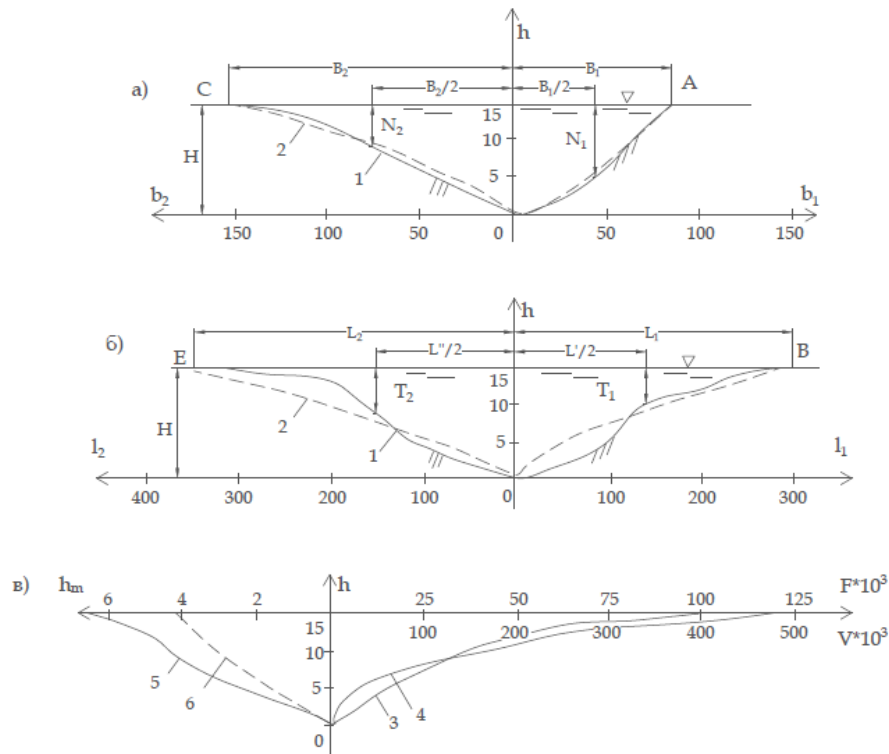


Рисунок 4. Озеро Донгуз-Орун-кель: а) поперечное сечение *AOC*; б) продольное сечение *BOE*; в) гидрофизические характеристики озера. 1 и 2 – реальные и модельные (расчетные) очертания котловины озера; 3 и 4 – батиграфические и объемные кривые озера; 5 и 6 – фактическая и расчетная кривые текущих значений средних глубин озера

Figure. 4. Lake Donguz-Orun-kel: a) cross section *AOC*; b) longitudinal section *BOE*; c) hydrophysical characteristics of the lake. 1 and 2 – real and model (design) outlines of the lake basin; 3 and 4 are bathymetric and volumetric curves of the lake; 5 and 6 are actual and calculated curves of the current values of the average depths of the lake

3. Водные объекты с овальной формой поверхности

Водные объекты в виде приледниковых озер с овальной формой поверхности разделяются поперечной линией $N - N$ на две части – правую (зоны 1, 2) и левую (зоны 3, 4) (рис. 1; 3 – левая часть; 5), для которых расчетные значения длин L_1 и L_2 определяются из условия равенства подсчитанных площадей F_{12} и F_{34} значениям площадей полуэллипсов, в виде

$$L_1 = \frac{4}{\pi(B_1 + B_2)} F_{12} \quad ; \quad L_2 = \frac{4}{\pi(B_1 + B_2)} F_{34} \quad . \quad (11)$$

Учет кривизны бортов котловины водоема. Линии продольного сечения по дну водоема на участках OB и OE могут быть представлены как прямолинейно наклонными, так и выпуклыми или вогнутыми кривыми различной кривизны (рис. 2б; 4б – левая часть; б), описываемыми зависимостями $l_1(h)$ и $l_2(h)$, в виде (Анахаев, 1997, 1998):

$$l_1 = L_1 \left(\frac{h}{H} \right)^{\frac{1}{t_1}} ; \quad l_2 = L_2 \left(\frac{h}{H} \right)^{\frac{1}{t_2}} , \quad (12)$$

где l_1, l_2 и h , соответственно, текущие значения горизонтальных и вертикальной координатных осей в продольно-вертикальной плоскости по линии EOB с центром O в наинижней точке основания; t_1 и t_2 – параметры искривленности тальвега на участках OB и OE , находятся по формулам (Анахаев, 1997, 1998)

$$t_1 = \frac{1}{\ln 2} \ln \left[\left(1 - \frac{T_1}{H} \right)^{-1} \right] = 1.443 \ln \left(\frac{H}{H - T_1} \right) ; \quad t_2 = 1.443 \ln \left(\frac{H}{H - T_2} \right) , \quad (13)$$

в которых T_1 и T_2 – глубины воды в продольном сечении озера на расстояниях $L'/2$ и $L''/2$ вправо и влево от начала координат.

Параметры t_1 и t_2 характеризуют вид и степень искривленности продольных участков основания OB и OE (рис. 2б). В частности, для t_1 (и для t_2):

- при $0 < t_1 < 1$ основание – выпуклая кривая;
- при $t_1 = 1$ основание – прямая наклонная линия;
- при $1 < t_1 \leq \infty$ основание – вогнутая кривая.

В поперечном сечении створа водоема AOC береговые склоны (шириной B_1 и B_2) также могут быть представлен как прямолинейно наклонными линиями, так и выпуклыми или вогнутыми кривыми различной кривизны (рис. 2а), описываемыми зависимостями текущих значений $b_1(h)$ и $b_2(h)$, в виде (Анахаев, 1997, 1998)

$$b_1 = B_1 \cdot \left(\frac{h}{H} \right)^{1/n_1} ; \quad b_2 = B_2 \cdot \left(\frac{h}{H} \right)^{1/n_2} , \quad (14)$$

где b_1, b_2 , и h , соответственно, текущие значения горизонтальной и вертикальной координатных осей в поперечно-вертикальной плоскости по линии AOC с центром O в наинижней точке основания; n_1 и n_2 – параметры искривленности береговых склонов OA и OC , находятся по зависимостям

$$n_1 = 1.443 \ln \left(\frac{H}{H - N_1} \right) ; \quad n_2 = 1.443 \ln \left(\frac{H}{H - N_2} \right) , \quad (15)$$

в которых N_1 и N_2 – глубины воды в поперечном сечении озера по линиям OA и OC , соответственно, на расстояниях $B_1/2$ и $B_2/2$ от начала координат.

Параметры n_1 и n_2 характеризуют вид и степень искривленности поперечных участков основания OA и OC (рис. 2а; 4а; 6а). В частности, для n_1 (и для n_2):

- при $0 < n_1 < 1$ береговой склон – выпуклая кривая;
- при $n_1 = 1$ береговой склон – прямая наклонная линия;
- при $1 < n_1 \leq \infty$ береговой склон – вогнутая кривая.

Площади горизонтальных поверхностей полуэллиптических форм в зонах 1-4 (f_1, f_2, f_3, f_4) на заданной высоте h от основания определяются зависимостями (Бронштейн, Семендяев, 1980):

$$f_1 = \frac{1}{4} \pi l_1 b_1; f_2 = \frac{1}{4} \pi l_1 b_2; f_3 = \frac{1}{4} \pi l_2 b_2; f_4 = \frac{1}{4} \pi l_2 b_1. \quad (16)$$

При этом, значения площадей поверхности зеркала водоема в рассматриваемых зонах 1-4 находятся по (16) при $h=H$, в виде:

$$F_1 = \frac{1}{4} \pi L_1 B_1; F_2 = \frac{1}{4} \pi L_1 B_2; F_3 = \frac{1}{4} \pi L_2 B_2; F_4 = \frac{1}{4} \pi L_2 B_1. \quad (17)$$

Полная площадь (расчетная) водной поверхности будет равна

$$F_{14} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4. \quad (18)$$

Объем озера в зоне 1 V_1 определится зависимостью:

$$V_1 = \int_0^H f_1 dh = \int_0^H \frac{\pi}{4} l_1 b_1 dh, \quad (19)$$

подставляя в которую значения l_1 и b_1 из формул (12), (14) и интегрируя получим текущие значения объема v_1 (для глубины h) в зоне 1 водоема, в виде

$$v_1 = \frac{\pi}{4} L_1 B_1 h \frac{t_1 n_1}{t_1 + n_1 (1 + t_1)} \cdot \left(\frac{h}{H} \right)^p \times \left(\frac{t_1 + n_1}{t_1 n_1} \right), \quad (20)$$

где « p » означает возведение в степень.

Учитывая пределы интегрирования в интервале $0 \leq h \leq H$, окончательное выражение для полного объема V_1 водоема (при $h = H$) в зоне 1 получит вид

$$V_1 = F_1 H \frac{t_1 n_1}{t_1 + n_1 (1 + t_1)} = \frac{\pi}{4} L_1 B_1 H \frac{t_1 n_1}{t_1 + n_1 (1 + t_1)}. \quad (21)$$

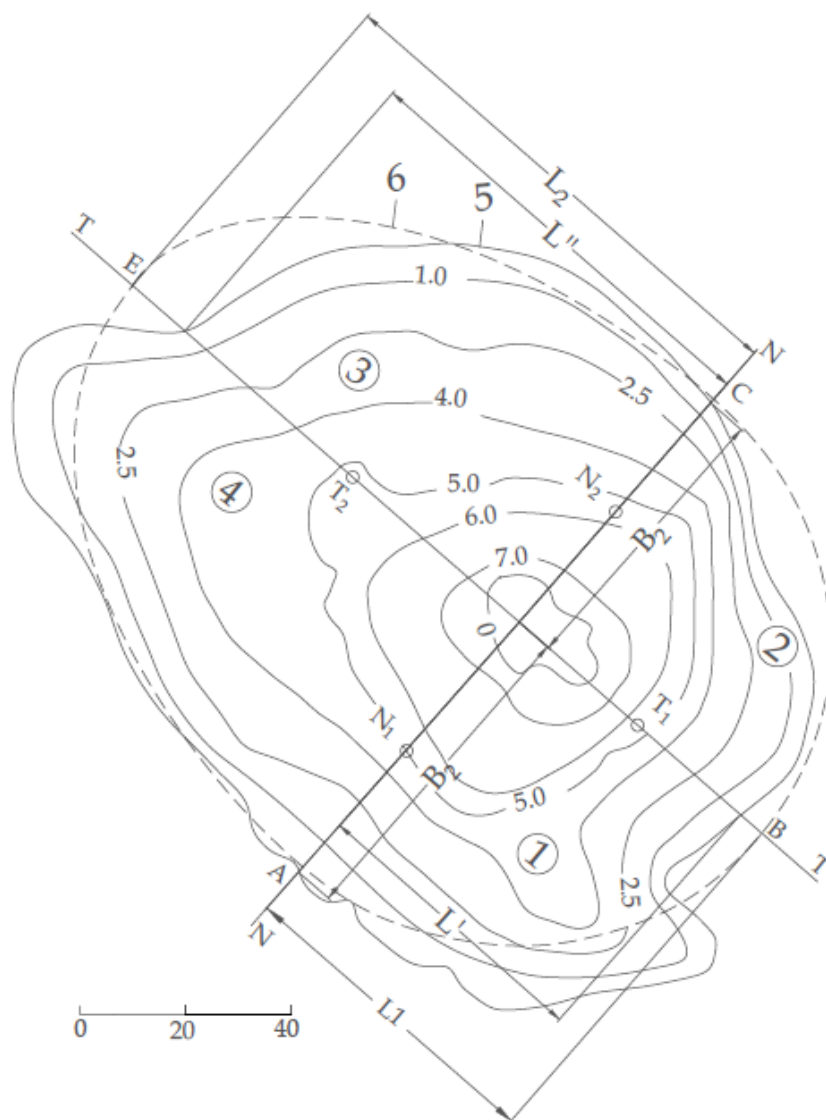


Рисунок 5. Карта в изобатах котловины озера Азау
1-4 – четыре модельные четверть-эллиптические зоны разделения поверхности озера,
соответственно – AOB, BOC, COE, EOA; 5 и 6 AOB, BOC, COE, EOA; реальная и расчетная
(равновеликая) очертания поверхности озера

Figure 5. Map in the isobaths of the basin of Lake Azau:
1-4 – four model quarter-elliptical zones of separation of the lake surface, respectively
– AOB, BOC, COE, EOA; 5 and 6 – real and calculated (equal) outlines of the lake surface

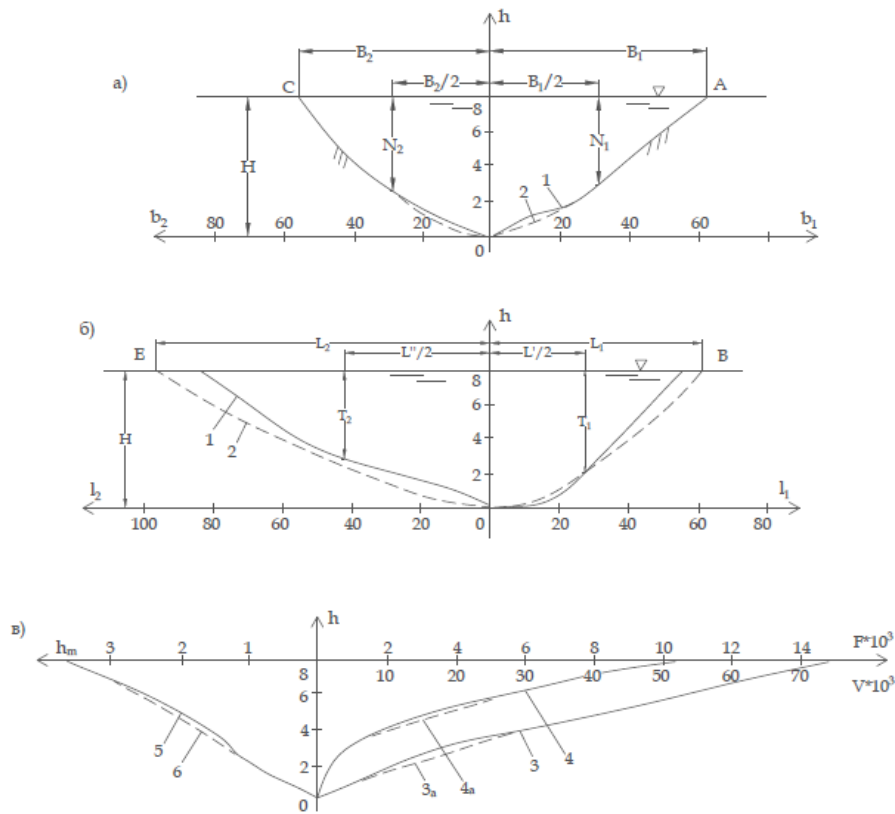


Рисунок 6. Озеро Азау: а) поперечное сечение *AOC*; б) продольное сечение *BOE*; в) гидрофизические характеристики озера. 1 и 2 – реальные и модельные (расчетные) очертания котловины озера; 3 и 4 – батиграфические и объемные кривые озера; 5 и 6 – фактическая и расчетная кривые текущих значений средних глубин озера

Figure 6. Lake Azau: a) cross-section *AOC*; б) longitudinal section *BOE*; c) hydrophysical characteristics of the lake. 1 and 2 – real and model (design) outlines of the lake basin; 3 and 4 are bathymetric and volumetric curves of the lake; 5 and 6 are actual and calculated curves of the current values of the average depths of the lake

Аналогичным образом получаем выражения для определения текущих (v_2, v_3, v_4) и полных (V_2, V_3, V_4) значений объемов в зонах 2-4, в виде:

$$v_2 = \frac{\pi}{4} L_1 B_2 h \frac{t_1 n_2}{t_1 + n_2 (1 + t_1)} \cdot \left(\frac{h}{H} \right) \times p \left(\frac{t_1 + n_2}{t_1 n_2} \right),$$

$$v_3 = \frac{\pi}{4} L_2 B_2 h \frac{t_2 n_2}{t_2 + n_2 (1 + t_2)} \cdot \left(\frac{h}{H} \right) \times p \left(\frac{t_2 + n_2}{t_2 n_2} \right), \quad (22)$$

$$v_4 = \frac{\pi}{4} L_2 B_1 h \frac{t_2 n_1}{t_2 + n_1 (1 + t_2)} \cdot \left(\frac{h}{H} \right) \times p \left(\frac{t_2 + n_1}{t_2 n_1} \right),$$

$$V_2 = F_2 H \frac{t_1 n_2}{t_1 + n_2 (1 + t_1)} = \frac{\pi}{4} L_1 B_2 H \frac{t_1 n_2}{t_1 + n_2 (1 + t_1)},$$

$$V_3 = F_3 H \frac{t_2 n_2}{t_2 + n_2 (1 + t_2)} = \frac{\pi}{4} L_2 B_2 H \frac{t_2 n_2}{t_2 + n_2 (1 + t_2)}, \quad (23)$$

$$V_4 = F_4 H \frac{t_2 n_1}{t_2 + n_1 (1 + t_2)} = \frac{\pi}{4} L_2 B_1 H \frac{t_2 n_1}{t_2 + n_1 (1 + t_2)}.$$

Формулы (21)-(23) учитывают искривленность профилей основания и береговых склонов котловины водоема посредством параметров t_1 , t_2 и n_1 , n_2 . При этом полный объем озера V_{14} определится по формуле

$$V_{14} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4. \quad (24)$$

В частности, для случая прямолинейности участков основания OB и OE ($t_1 = t_2 = 1$) и береговых склонов OA и OC ($t_1 = t_2 = 1$) формула для полного объема (24) принимает вид

$$V_{14} = \frac{1}{3} H F_{14}, \quad (25)$$

что совпадает с точной формулой для объема конуса высотой H и основанием F_{14} .

Средняя глубина озера h_m в общем случае определится зависимостью (9).

Текущее значение средней глубины h_{mi} (для заданной глубины h) рассматриваемого водоема определяется как отношение сумм текущих объемов четырех зон к сумме текущих их площадей

$$h_{mi} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}{f_1 + f_2 + f_3 + f_4}, \quad (26)$$

в котором значения площадей (f_1, f_2, f_3, f_4) и объемов (v_1, v_2, v_3, v_4) находятся по формулам (16) и (20), (22).

Показатель емкости C_I определится по формуле (10).

4. Водные объекты с круговой (полукруговой) формой поверхности

Водные объекты в виде озер с круговой (полукруговой) формой поверхности (Schweizer, 1957) могут образоваться в приледниковых моренных отложениях и на поверхностях ледника, карстовых пород, а также при наступании и отступании ледника основной долины в местах сопряжения его с боковыми притоками и береговой мореной. Для таких водных объектов с круговой формой при определении гидрогеофизических характеристик используются вышеприведенные формулы (10)-(23), в которых значения $B_1=B_2=L_1=L_2$. При этом, для частных случаев получаем решения:

– при равенстве параметров $t_1=t_2=n_1=n_2$ для кругового (полукругового) озера с симметричными (круговыми) боковыми склонами одинакового очертания;

– при равенства параметров $t_1=t_2=n_1=n_2=\infty$ для объема кругового цилиндрического озера (с использованием правила Лопитала для раскрытия неопределенности ∞/∞) получим, в виде

$$V = \pi B_1^2 H ,$$

что совпадает с точной формулой объема кругового цилиндра с радиусом основания B_1 и высотой H (Бронштейн, Семендяев, 1980);

– при равенства параметров $t_1=t_2=n_1=n_2=1$ для объема кругового конусного озера с прямолинейными наклонными боковыми склонами, в виде

$$V = \frac{\pi}{3} B_1^2 H ,$$

что совпадает с точной формулой объема кругового конуса с радиусом основания B_1 и высотой H (Сейнова, Золотарев, 2001).

5. Водные объекты с треугольной формой поверхности

Водные объекты в виде приледниковых озер и водоемов треугольной формы и вертикальностью подпорного створа (рис. 3, *правее оси N-N*) могут образоваться в основной долине при отступании ледника и перекрытии русла телом наступающего ледника бокового притока, либо крупных обвалов горных пород в русло водотока, а также при создании искусственных водоемов (водохранилищ, селехранилищ) путем перекрытия русел водотоков подпорными сооружениями (бетонными плотинами, селеудерживающими конструкциями и др.). Методика расчета емкости таких водных объектов аналогична водоемам с полуэллиптической формой. Ниже приводятся расчетные зависимости применительно к водоему треугольной формы, включающей две компоновочные зоны – 1 и 2, с площадями F_1 и F_2 , предполагая в данном случае

отсутствие зон 3 и 4 (рис. 3, левее *оси N-N*) из-за перекрытия ледником (или бетонной плотиной). При этом, расчетное значение длины L_1 для этих зон определяется из условия равенства фактического значения суммы их площадей F_f , подсчитанного по карте изобат и равного $F_f = F_{12}$, величине равновеликой площади расчетного водоема треугольной формы ABC , в виде

$$L_1 = \frac{2}{B_1 + B_2} F_{12} . \quad (27)$$

В таком водоеме глубиной H поперечные сечения береговых склонов шириной B_1, B_2 и продольный профиль основания длиной L_1 могут быть представлены как прямыми наклонными линиями, так и выпуклыми (или вогнутыми) кривыми, описываемыми зависимостями $l_1(h)$ и $b_1(h), b_2(h)$ (рис. 4б - правая часть; 4а), соответственно, по формулам (12), (14). При этом площади горизонтальных поверхностей в зонах 1, 2 (f_1, f_2) на заданной высоте h от основания определяются зависимостями (Бронштейн, Семендяев, 1980):

$$f_1 = 0.5l_1b_1; \quad f_2 = 0.5l_1b_2 , \quad (28)$$

а площади поверхности зеркала водоема (при $h=H$), соответственно, равны:

$$F_1 = 0.5L_1B_1; \quad F_2 = 0.5L_1B_2 . \quad (29)$$

Объемы водоема в зонах 1 и 2 определяются по зависимостям

$$V_1 = \int_0^H f_1 dh = \int_0^H \frac{1}{2} l_1 b_1 dh , \quad V_2 = \int_0^H f_2 dh = \int_0^H \frac{1}{2} l_1 b_2 dh , \quad (30)$$

подставляя в которые значения l_1 и b_1, b_2 из формул (12), (14) и интегрируя, получим текущие значения (при заданном h) объемов в зонах 1 и 2 (v_1, v_2) в виде

$$v_1 = \frac{1}{2} L_1 B_1 h \frac{t_1 n_1}{t_1 + n_1 (1 + t_1)} \cdot \left(\frac{h}{H} \right) \times p \left(\frac{t_1 + n_1}{t_1 n_1} \right) , \quad (31)$$

$$v_2 = \frac{1}{2} L_1 B_2 h \frac{t_1 n_2}{t_1 + n_2 (1 + t_1)} \cdot \left(\frac{h}{H} \right) \times p \left(\frac{t_1 + n_2}{t_1 n_2} \right) .$$

Учитывая пределы интегрирования $0 \leq h \leq H$, окончательные выражения для полных объемов (при $h = H$) в зонах 1 и 2 (V_1, V_2) получают вид

$$V_1 = F_1 H \frac{t_1 n_1}{t_1 + n_1 (1 + t_1)} = \frac{1}{2} L_1 B_1 H \frac{t_1 n_1}{t_1 + n_1 (1 + t_1)} , \quad (32)$$

$$V_2 = F_2 H \frac{t_1 n_2}{t_1 + n_2 (1 + t_1)} = \frac{1}{2} L_1 B_2 H \frac{t_1 n_2}{t_1 + n_2 (1 + t_1)} .$$

Формулы (31) и (32) учитывают искривленность профилей основания OB и береговых склонов OA и OC посредством параметров t_1 и n_1 , n_2 . В частности, для случая прямолинейности основания ($t_1=1$) и береговых склонов ($n_1=n_2=1$) формулы для объемов принимают вид

$$V_1 = \frac{1}{6} L_1 B_1 H = \frac{1}{3} F_1 H ; \quad V_2 = \frac{1}{6} L_1 B_2 H = \frac{1}{3} F_2 H , \quad (33)$$

которые совпадают с точной формулой для объема пирамиды (Бронштейн, Семендяев, 1980).

При этом общий объем треугольного водоема V_{12} (включающего зоны 1 и 2) будет равен

$$V_{12} = V_1 + V_2 . \quad (34)$$

Средняя глубина озера h_m определится зависимостью (9), в которую вместо V и F подставляются значения V_{12} и полной площади треугольной водной поверхности водоема $F_{12}=F_1+F_2$.

При этом, текущее значение средней глубины h_{mi} (для заданной глубины h) рассматриваемого треугольного водоема определяется как отношение сумм текущих объемов зон 1 и 2 к сумме их текущих площадей:

$$h_{mi} = \frac{v_1 + v_2}{f_1 + f_2} , \quad (35)$$

в котором значения f_1, f_2 и v_1, v_2 находятся по формулами (28) и (31).

6. Водные объекты с подпорными перемычками, имеющими верховой клин

Подпорные перемычки (плотины) с подводным верховым клином могут быть образованы на водных объектах как природного генезиса (при отступании ледника от конечной морены, завалах основной долины обвалами и оползнями береговых склонов, селевыми и лавинными отложениями боковых притоков и др.), так и искусственных грунтовых плотин (Анахаев, 2022) (рис. 7), в том числе на объектах промышленной гидротехники. В таких подпорных перемычках образуется наклонный верховой откос с заложением « m », уходящий под уровень верхнего бьефа водоема. При этом, объем массива грунта в верховом клине может занимать существенную часть объема водоема, как,

например, в намывных плотинах, хвостохранилищах, шламонакопителях. Величина указанного заложения, равная $m = \text{ctg}\alpha$, где α – угол наклона откоса к горизонту, зависит от физико-механических свойств тела завальной перемычки.

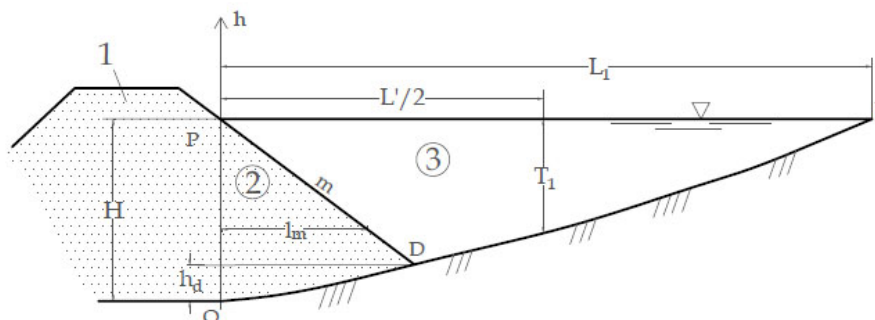


Рисунок 7. Расчетная схема продольного сечения завальной плотины с верховым клином: 1 – завальная плотина; 2 – верховой клин плотины PDO; 3 – емкость завального водоема PBD

Figure 7. Design diagram of the longitudinal section of the captive dam with a top wedge: 1 – captive dam; 2 – dam top wedge PDO; 3 – capacity of the overburden reservoir PBD

Нижняя часть наклонного откоса при этом сопрягается с основанием водоема в точке D на высоте h_d от наименьшей точки основания (центра координат), значение которого определяется из нижеследующего уравнения (подбором, графически и др.).

$$h_d + \frac{L_1}{m} \left(\frac{h_d}{H} \right)^{1/t_1} - H = 0. \quad (36)$$

Для частных случаев $t_1 = 0.5; 1.0; 2.0$ величина h_d будет равна:

$$h_d = \frac{mH^2}{2L_1} \left(\sqrt{1 + 4 \frac{L_1}{mH}} - 1 \right) \quad \text{при } t_1 = 0.5,$$

$$h_d = \frac{mH^2}{L_1 + mH} \quad \text{при } t_1 = 1, \quad (37)$$

$$h_d = \frac{L_1^2}{m^2 H} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{mH}{L_1} \right)^2} - 1 \right]^2 \quad \text{при } t_1 = 2.$$

Объемы верхового клина завального тела плотины для зон 1 и 2 (V_{d1} , V_{d2}), находящиеся в водоеме полуэллиптической формы, определяются по зависимостям:

$$V_{d1} = \int_0^{h_d} \frac{\pi}{4} b_1 l_1 dh + \int_{h_d}^H b_1 l_m dh ; \quad (38)$$

$$V_{d2} = \int_0^{h_d} \frac{\pi}{4} b_2 l_1 dh + \int_{h_d}^H b_2 l_m dh ,$$

где l_m – текущее значение горизонтальной проекции верхового откоса на глубине h , равное $l_m = m(H - h)$.

Интегрируя уравнения (38) с учетом значения l_m , получим объемы верхового клина в зонах 1 и 2 (V_{d1} и V_{d2}), в виде:

$$V_{d1} = J_1 + j_1 ; \quad V_{d2} = J_2 + j_2 , \quad (39)$$

в которых $J_1 = v_1$ и $J_2 = v_2$ находятся по формулам (20) и (22), подставляя вместо h значение h_d из (36)

$$J_1 = \frac{\pi}{4} L_1 B_1 h_d \frac{t_1 n_1}{t_1 + n_1 (1 + t_1)} \cdot \left(\frac{h_d}{H} \right) \times p \left(\frac{t_1 + n_1}{t_1 n_1} \right) ; \quad (40)$$

$$J_2 = \frac{\pi}{4} L_1 B_2 h_d \frac{t_1 n_2}{t_1 + n_2 (1 + t_1)} \cdot \left(\frac{h_d}{H} \right) \times p \left(\frac{t_1 + n_2}{t_1 n_2} \right) ,$$

а величины j_1 и j_2 подсчитываются по зависимостям

$$j_1 = m B_1 H^2 \left\{ \frac{n_1}{1 + n_1} \left[1 - \left(\frac{h_d}{H} \right) \times p \left(\frac{1 + n_1}{n_1} \right) \right] - \frac{n_1}{1 + 2n_1} \left[1 - \left(\frac{h_d}{H} \right) \times p \left(\frac{1 + 2n_1}{n_1} \right) \right] \right\} ; \quad (41)$$

$$j_2 = m B_2 H^2 \left\{ \frac{n_2}{1 + n_2} \left[1 - \left(\frac{h_d}{H} \right) \times p \left(\frac{1 + n_2}{n_2} \right) \right] - \frac{n_2}{1 + 2n_2} \left[1 - \left(\frac{h_d}{H} \right) \times p \left(\frac{1 + 2n_2}{n_2} \right) \right] \right\} .$$

Полный объем верхового клина завального тела плотины V_d будет равен

$$V_d = V_{d1} + V_{d2} . \quad (42)$$

Для частного случая горизонтального основания ($t_1 = \infty$, $h_d = 0$) и прямолинейных береговых склонов ($n_1 = n_2 = 1$) формулы (39) и (42) совпадают с точной формулой несимметричной пирамиды высотой mH (Бронштейн, Семендяев, 1980)

$$V_{d1} = \frac{1}{6}mB_1H^2; \quad V_{d2} = \frac{1}{6}mB_2H^2; \quad V_d = \frac{1}{6}mH^2(B_1 + B_2). \quad (43)$$

Объем водоема полуэллиптической формы V_s за вычетом находящегося в нем объема верхового клина V_d завального тела плотины будет равен

$$V_s = V_{12} - V_d, \quad (44)$$

где $V_{12} = V_1 + V_2$ – значение объема полуэллиптического водоема, в которой V_1 и V_2 находятся по (21) и (23).

Средняя глубина водоема полуэллиптической формы $h_{m(s)}$ с учетом объема верхового клина плотины определится по формуле

$$h_{m(s)} = \frac{V_s}{F_1 + F_2}, \quad (45)$$

в которой F_1 и F_2 находятся по формулам (17).

Для треугольных водоемов при наличии верхового клина в перемычках (плотинах) уравнения (38) объемы V_{d1} и V_{d2} в зонах 1 и 2 находятся аналогичным образом:

$$V_{d1} = I_1 + j_1; \quad V_{d2} = I_2 + j_2, \quad (46)$$

в которых $L_1 = v_1$ и $L_2 = v_2$ находятся по формулам (31), подставляя вместо h значение h_d из (36), а величины j_1 и j_2 подсчитываются по зависимостям (41).

Для треугольного водоема, учитывая значения V_{d1} и V_{d2} по (46), находятся объемы верхового клина V_d по (43) емкость водоема V_s по (44) и средняя глубина водоема $h_{m(s)}$ по (45), в которой F_1 и F_2 – по формулам (29).

Изложенная методика определения гидрогеофизических параметров прорывоопасных водных объектов ориентирована на выполнение расчетов на основе использования имеющихся у исследователей архивных геоморфологических и топографических материалов, а также получения исходных данных дистанционными методами (Коновалов, 2008), к которым относятся, прежде всего, площадь водного объекта с линейными сечениями, а также глубины T_1 , T_2 и N_1 , N_2 , соответственно, в средних частях продольного и поперечных сечений в створе наибольшей глубины.

В случаях отсутствия данных по указанным глубинам и невозможности (при труднодоступности) непосредственного их измерения возможно использовать приближенные методы их нахождения по данным дистанционных измерений. В этой связи для подпруженных приледниковых озер и завальных водоемов по данным отметок и плановых положений нескольких точек на линии продольного профиля долины устанавливается уклон основания водного объекта, по которому находятся максимальная глубина H в подпор-

ном створе и глубины T_1 и T_2 в средней части зон 1 и 2 водоема (Коновалов, 2008; Анахаев, 2022). Глубины N_1, N_2 в средних частях береговых склонов в подпорном створе находятся аналогичным образом используя для этого уклоны прилегающих склонов в приурезной полосе водоема.

Необходимо добавить, что при более сложной форме водоема в плане (расчлененной, состоящей из нескольких типовых участков, например, вверх по разным притокам, и пр.) можно применить принцип суперпозиции объемов разных частей водоема, и тем самым предлагаемая методика имеет абсолютно универсальный характер и пригодна фактически для водоемов любой формы.

Кроме того, важно, что при численном моделировании волн прорыва соответствующих объектов можно заложить в расчет зависимость объема водохранилища от уровня воды по простым формулам с небольшим количеством легко определяемых коэффициентов.

7. Верификация предложенной методики расчета

Ниже приводятся примеры сравнительной оценки результатов предлагаемых расчетных зависимостей с фактическими данными, полученными непосредственно с топографии (карт изобат) озер Сылтран–кель (Крыленко и др., 2008), Донгуз–Орун–кель и Азау (Зимницкий, 2005). При этом, с целью сокращения записей в расчетном тексте приводятся только разовые обозначения единиц измерения различных величин, имея в виду их значения: для объемов – тыс. м³; для площадей – тыс. м²; для линейных величин (длины, ширины, глубины) – м; для показателей (коэффициентов) – безразмерные.

7.1. Приледниковое озеро Сылтран–кель

На рис. 1 представлено приледниковое озеро Сылтран–кель с топографической картой изобат котловины озера на 26.08.2005 г. (Крыленко и др., 2008). Разделив поверхность озера продольной $T-T$ и поперечной $N-N$ линиями с центром O в месте наибольшей глубины $H=37.5$ (м) получим четверть-эллиптические компоновочные зоны 1 (AOB), 2 (BOC), 3 (COE), 4 (AOE) с размерами (в масштабе) $B_1=185.8$ (м), $B_2=172.8$, $L'_1=285.6$, $L''_2=293.4$, исходя из которых находим глубины $N_1=33.0$ (м), $N_2=17.0$, $T_1=15.0$, $T_2=26.0$ в средних точках указанных участков, то есть на расстояниях $B_1/2$, $B_2/2$, $L'_1/2$, $L''_2/2$ от центра O .

По карте изобат графоаналитическим методом (методом палетки) подсчитываем максимальное (при $V=3186.0$ м) фактическое значение площади водной поверхности, равное $F_f=159.0$ (тыс. м²) (по (Крыленко и др., 2008) $F=158.0$), в том числе для правой F_{12} (зоны 1, 2) и левой F_{34} (зоны 3, 4) частей озера, равные $F_{12}=74.712$ и $F_{34}=84.277$.

Следует отметить, что в работе (Кидяева и др., 2013) приводятся значения площади поверхности озера Сылтран–кель, равное 149.4, что не соответствует фактическому значению по (Крыленко и др., 2008) (хотя, в обоих источниках Крыленко И.Н., Крыленко И.В. – соавторы).

На основе полученных значений F_{12} и F_{34} по формулам (11) определяем расчетные величины длин L_1 и L_2 для равновеликих полуэллиптических водных поверхностей, соответственно, для правой и левой частей озера, равные $L_1=265.3$ и $L_2=299.2$.

По формулам (13) и (15) находим значения параметров искривленности продольных донных (t_1, t_2) и поперечных береговых (n_1, n_2) участков котловины озера, равные $t_1=0.737, t_2=1.706$ и $n_1=3.060, n_2=0.871$.

Значения объемов в зонах 1-4 (V_1, V_2, V_3, V_4) находятся по формулам (21), (23): $V_1=541.0$ (тыс. м³), $V_2=385.3, V_3=557.0, V_4=855.8$.

Полный объем озера Сылтран-кель по предлагаемой методике равен $V_{14}=2339.0$, что согласуется (+4.3%) с фактическим объемом озера $V_f=2242.2$, подсчитанным по карте с изобатами (объем озера по (Крыленко и др., 2008) составляет $V=2200.0$).

На рис. 2а, б представлены фактические профили – 1 поперечных и продольных сечений озера, а также расчетные профили – 2 указанных сечений по предложенной математической модели. На графиках (рис. 2 в) приведены батиграфическая $F(h)$ – 3 и объемная $V(h)$ – 4 кривые чаши озера, а также факторологическая – 5 и расчетная по (26) – 6 кривые текущих значений средней глубины $h_{mi}(h)$ в зависимости от заданного значения h . При этом, максимальное значение (на уровне поверхности водоема) средней глубины равно $h_m=14.7$, а показатель емкости озера $c_l=0.39$, что больше аналогичного показателя перевернутого конуса 0.33, но меньше эллиптического параболоида 0.50.

Как видно из графиков, предложенная модель достаточно близко описывает очертания котловины озера по направлениям OA, OC , приемлемо по OB и удовлетворительно по OE . Батиграфическая и объемная кривые имеют схожие (в разных масштабах) законы изменения по глубине. Расчетная кривая средней глубины достаточно близко согласуется с фактической. При этом следует отметить, что более половины (~ 52%) емкости озера располагается в верхней 10 метровой зоне.

7.2. Приледниковое озеро Донгуз-Орун-кель

На рис. 3; 8 представлено приледниковое озеро Донгуз-Орун-кель с топографической картой изобат котловины озера (Зимницкий, 2005). Разделив поверхность озера продольной $T-T$ и поперечной $N-N$ линиями с центром O в месте наибольшей глубины $H=15.0$ (м) получим 2 треугольные зоны 1 (AOB), 2 (BOC) и 2 четверть-эллиптические зоны 3 (COE), 4 (AOE) с размерами (в масштабе) $B_1=87.0$ (м), $B_2=153.0, L'_1=280.0, L''_2=309.0$, исходя из которых находим глубины $N_1=9.5$ (м), $N_2=5.5, T_1=5.0, T_2=6.1$ в средних точках указанных участков, то есть на расстояниях $B_1/2$ и $B_2/2, L'_1/2, L''_2/2$ от центра O .

По карте изобат графоаналитическим методом подсчитываем максимальное (при $\nabla=2515.0$ м) фактическое значение площади водной поверхности, равное $F_f=102.2$ (тыс. м²), в том числе для правой F_{12} треугольной (зоны 1, 2) и левой F_{34} полуэллиптической (зоны 3, 4) частей озера, соответственно,

равные $F_{12}= 35.9$ и $F_{34}= 66.3$. Следует отметить, что в (Муравейский, 1960а; Ефремов и др., 2010, с. 122) приводятся неверные значения площади озера Донгуз-Орун-кель, равные 59.7 (-43.1%) и 80.0 (-21.7%) – не соответствующие ее реальному значению 102.2.



Рисунок 8. Обследование водосбора приледникового озера Донгуз-Орун-кель
(д.т.н. Анахаев К.Н., д.т.н. Беликов В.В.)

Figure 8. Pre-glacial Lake Donguz-Orun-kel catchment survey
(Doctor of Technical Sciences Anakhaev K.N., Doctor of Technical Sciences Belikov V.V.)

На основе подсчитанных значений F_{12} и F_{34} , соответственно, по формулам (27) и (11) определяем расчетные значения длин L_1 и L_2 для равно-великих треугольной и полуэллиптической водных поверхностей для правой (зоны 1, 2) и левой (зоны 3, 4) частей озера, равные $L_1= 299.2$ и $L_2= 351.9$.

По формулам (13) и (15) находим значения параметров искривленности продольных донных (t_1, t_2) и поперечных береговых (n_1, n_2) участков котловины озера, равные $t_1=0.585, t_2=0.753$ и $n_1=1.448, n_2=0.659$.

Значения объемов в треугольных зонах 1, 2 находятся по формулам (32): $V_1= 57.4$ (тыс. м³), $V_2= 81.3$, а в полуэллиптических зонах 3, 4 по (23): $V_3= 165.0, V_4= 119.5$.

Полный объем озера Донгуз-Орун-кель по предлагаемой методике составил $V_{14} = 423.2$, что вполне приемлемо (-9.2%) согласуется с фактическим объемом $V_f= 466.6$, подсчитанным по карте с изобатами, учитывая сложную геоморфологическую котловину озера (объем озера по (Зимницкий, 2005) составляет $V= 465.0$).

На рис. 4а, б представлены фактические профили – 1 поперечных и продольных сечений озера, а также расчетные профили – 2 указанных сечений, по предложенной математической модели. На графиках (рис. 4в) приведены батиграфическая $F(h)$ – 3 и объемная $V(h)$ – 4 кривые чаши озера, а также факторологическая – 5 и расчетная по (26) – 6 кривые текущих значений средней глубины $h_{mi}(h)$, в которой v_1, f_1 и f_2, v_1 находятся, соответственно, по (28) и (31), а v_2, f_3 и f_4, v_3 по (16) и (22). При этом, максимальное значение (на уровне поверхности водоема) средней глубины равно $v_4 = 4.14$, а показатель емкости озера $h_m = 0.28$, что меньше аналогичного показателя перевернутого конуса 0.33.

Как видно из графиков, предложенная модель весьма близко описывает очертания котловины озера по направлениям OA , OC , приемлемо по OB и удовлетворительно по OE . Батиграфическая и объемная кривые имеют схожие (в разных масштабах) законы изменения по глубине. Имеющиеся различия расчетной кривой средней глубины от фактической объясняются сложной геоморфологией котловины озера и наличием обширной (~ 100 м) мелководной зоны. При этом следует отметить, что около половины (~ 48%) емкости озера располагается в верхней 2 метровой зоне.

7.3. Приледниковое озеро Азау

На рис. 5 представлено приледниковое озеро Азау с топографической картой изобат котловины озера (Зимницкий, 2005). Разделив поверхность озера продольной $T-T$ и поперечной $N-N$ линиями с центром O в месте наибольшей глубины $H = 8.0$ (м) получим четверть-эллиптические зоны 1 (AOB), 2 (BOC), 3 (COE), 4 (AOE) с размерами (в масштабе) $B_1 = 62.0$ (м), $B_2 = 56.1$, $L'_1 = 55.2$, $L''_2 / 84.2$, исходя из которых находим глубины $N_1 = 5.0$ (м), $N_2 = 5.7$, $T_1 = 5.75$, $T_2 = 5.15$ в средних точках указанных участков, то есть на расстояниях $B_1/2$ и $B_2/2$, $L'_1/2$, $L''_2/2$ от центра O .

По карте изобат графоаналитическим методом подсчитываем максимальное (при $\nabla = 3264.0$ м) фактическое значение площади водной поверхности, равное $F_f = 14.68$ (тыс. м²), в том числе для полуэллиптических правой F_{12} (зоны 1, 2) и левой F_{34} (зоны 3, 4) частей озера, соответственно, равные $F_{12} = 5.63$ и $F_{34} = 9.05$. На основе последних по формулам (10) определяем расчетные значения длин L_1 и L_2 для равновеликих полуэллиптических водных поверхностей, соответственно, для правой и левой частей озера, равные $L_1 = 60.65$ и $L_2 = 97.56$.

По формулам (12) и (14) находим значения параметров искривленности продольных донных (t_1, t_2), и поперечных береговых (n_1, n_2) участков котловины озера, равные $t_1 = 1.83$, $t_2 = 1.489$ и $n_1 = 1.415$, $n_2 = 1.799$.

Значения объемов зонах 1-4 (V_1, V_2, V_3, V_4) находятся по формулам (18), (20): $V_1 = 10.50$ (тыс. м³), $V_2 = 10.17$, $V_3 = 15.44$, $V_4 = 16.0$.

Полный объем озера Азау по предлагаемой методике составил $V = 52.10$, что согласуется (-2.4%) с фактическим объемом озера $V_f = 53.40$, подсчитанным по карте с изобатами. Следует отметить, что в работах (Анахаев, 1998,

с.39; Богаченко и др., 2008) приводятся неверные значения площади водной поверхности $F = 20.0$ и объема $V = 70.3$ озера Азау, не согласующиеся с вышеприведенными данными, соответственно, на + 35.1% и + 31.6%.

На рис. 6а, б представлены фактические профили – 1 поперечных и продольных сечений озера, а также расчетные профили – 2 указанных сечений по предложенной математической модели, из которых видно, что модельные очертания поперечных сечений OA и OC весьма близко согласуются с реальной кривизной береговых склонов. На графиках (рис. 6в) приведены батиграфическая $F(h)$ – 3 и объемная $V(h)$ – 4 кривые чаши озера, построенные по зависимостям (11)-(23), а также факторологическая – 5 и расчетная по (26) – 6 кривые текущих значений средней глубины $h_{mi}(h)$, в которой f_1, f_2, f_3, f_4 и v_1, v_2, v_3, v_4 находятся, соответственно, по (16) и (20), (22). При этом, максимальное значение (на уровне поверхности водоема) средней глубины равно $h_m = 3.55$, а показатель емкости озера $c_I = 0.44$, что больше аналогичного показателя перевернутого конуса 0.33, но меньше эллиптического параболоида 0.50.

Как видно из графиков, предложенная модель весьма близко описывает очертания котловины озера по направлениям OA, OC , приемлемо по OB и удовлетворительно по OE . Расчетные батиграфическая и объемная кривые, а также кривая средней глубины, практически полностью совпадают с фактическими данными. При этом следует отметить, что около половины (~ 48%) емкости озера располагается в верхней 2 метровой зоне.

Для сравнительной оценки объема верхового клина выполнены подсчеты по предлагаемой методике для левой части озера Сылтран-кель объемом $V_{I2} = 926.3$ (при максимальной глубине $H = 37.5$) в предположении его подпора плотиной при значениях заложения верхового откоса равных $m = 1; 2; 3$. Для данных случаев, по рекомендуемым зависимостям (36)-(42) получены объемы верхового клина, равные $V_d = 105.4; 202.2; 299.0$, что составляет (при пологих откосах) достаточно существенную часть от объема озера, соответственно, до 11.4; 21.8; 32.3%.

Заключение

Работа посвящена изучению условий возникновения и развития горных прорывоопасных водных объектов – приледниковых озер и запрудных водоемов, прорывы которых представляют большую угрозу безопасности жизнедеятельности для нижерасположенных населенных пунктов и объектов экономики. При этом одним из важных вопросов является определение гидрогеофизических характеристик водоемов (площади поверхности, объема, максимальной и средней глубины и др.), необходимых для создания математических моделей, оперативного прогноза развития водоема и риска его прорыва в чрезвычайных ситуациях и др. Показано, что главнейшим и наиболее трудноопределяемым параметром рассматриваемых водных объектов является их объем, значения которого должны иметь обязательное обоснование с указанием способов определения, принятых допущений.

Предложена новая методика оперативного (быстрого) определения объема водоемов на основе замены поверхностей водоемов расчетными схемами равновеликих (полу)эллиптической, (полу)круговой, треугольной и смешанной форм, а также известных значений максимальной глубины и глубин в 4 точках продольного и поперечного сечений.

Получены расчетные зависимости для определения текущих и полных значений площади водной поверхности, объема водоема, средней глубины водоема (в том числе, при наличии верхового клина подпорной перемычки) с комплексным учетом различных форм очертаний котловины (прямолинейной, выпуклой, вогнутой), представлены графики их зависимостей от текущей глубины водоема. Сравнения подсчитанных результатов с фактическими объемами по картам изобат озер Сылтран-кель, Донгуз-Орун-кель, Азау дало приемлемое для практических целей совпадение (+4.3, -9.2 и -2.4%). Построены батиграфические и объемные кривые озер, а также кривые текущих средних глубин. Выполнен пример сравнительного расчета объема верхового клина завальной плотины при разных его заложениях. Для частных случаев предложенные зависимости совпадают с точными формулами объемов цилиндра, конуса, пирамиды, клина. С использованием принципа суперпозиции предложенная методика применима для определения объемов как водоемов любой формы и генезиса, так и для объемов холмов, бугров, отвалов, небольших островов, айсбергов и др.

Работа выполнена в рамках тем Государственного задания ИВП РАН № FMWZ-2022-0001 и ИПМА КБНЦ РАН №122041800015-8.

Список литературы

Акулов, В.В. (1948) Некоторые наблюдения над состоянием Сарезского озера в 1946 г., *Известия Всесоюзного географического общества*, т. 80, № 3, с. 246-258.

Анахаев, К.К. (2022) О дистанционном определении основных характеристик завальных водоемов, *Природообустройство*, № 2, с. 94-98, doi: 10.26897/1997-6011-2022-2-94-98.

Анахаев, К.Н. (1997) *Совершенствование конструкций, методов расчетного обоснования и проектирования противофильтрационных устройств грунтовых плотин*, Диссертация доктора техн. наук, М., МГУП, 521 с.

Анахаев, К.Н. (1998) *Фильтрационные расчеты земляных плотин*, КБГ-СХА, Нальчик, 34 с.

Анахаев, К.Н., Аджиев, А.Х., Чупринин, С.Л. (2003) О некоторых новых противоселевых мероприятиях, *Защита народнохозяйственных объектов от воздействия селевых потоков. Материалы Междунар. конф. по селям 17-21 ноября 2003 г.* Пятигорск, Новочеркасск - Пятигорск, с. 81-84.

Анисимов, Д.А. (2014) Методические вопросы информационного обеспечения создания банка данных в задаче численной оценки подверженности геосистем опасным природным процессам, *Известия КБНЦ РАН*, № 6 (62), с. 66-73.

Богаченко, Е.М., Ильичев, Ю.Г., Зимницкий, А.В. (2008) Исследование гляциальных озер Приэльбрусья на предмет их потенциальной селевой опасности, *Труды Всеросс. конф. по селям 26-28 октября 2005г.*, ВГИ, М., Из-во ЛКИ, с. 175-181.

Богословский, Б.Б. (1960) *Озероведение*, МГУ, 332 с.

Бронштейн, И.Н., Семендяев, К.А. (1980) *Справочник по математике*, М., Наука, 915 с.

Верещагин, Г.Ю. (1930) Методы морфометрической характеристики озер, *Труды Олонецкой научной экспедиции*, ч. 2, в. 1, Л., ГГИ, 115 с.

Виноградов, Ю.Б. (1977) *Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки*, Л., Гидрометеиздат, 155 с.

Виноградов, Ю.Б., Виноградова, Т.А. (2008) *Современные проблемы гидрологии*, М., 319 с.

Ефремов, Ю.Г., Панов, В.Д., Базелюк, А.А., Лурье, П.М. (2010) *Озера Предкавказья и Большого Кавказа*, Ростов-на-Дону, 239 с.

Зимницкий, А.В. (2005) *Формирование, распространение и динамика приледниковых озер Западного и Центрального Кавказа*, Дисс. ...канд. геогр. наук, КГУ, Краснодар, 186 с.

Зимницкий, А.В., Николайчук, А.В. (2006) Современное оледенение и приледниковые озера в верховьях Малки (Центральный Кавказ), Изменение природной среды на рубеже тысячелетий. *Труды Международной электронной конференции*, Тбилиси, Москва, с. 35-40.

Керемкулов, В.А. (1985) Морфометрические характеристики и классификация моренных озер, *Селевые потоки*, Сборник 9, Казахский региональный НИИ, М., Гидрометеиздат, с. 36-47.

Кидяева, В.М., Крыленко, И.Н., Крыленко, И.В., Петраков, Д.А., Черноморец, С.С. (2013) Колебания уровня воды в горных ледниковых озерах Приэльбрусья, *Геориск*, № 3, с. 20-27.

Кодяев, Г.В. (1973) Морфометрическая характеристика озера Иссык-Куль, *Известия Всесоюзного географического общества*, т. 105, № 4, с. 362-365.

Коновалов, В.Г. (2008) Дистанционный мониторинг прорывоопасных высокогорных озер на Памире, Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита, *Труды Международной конференции 22-29 сентября 2008 г.*, Пятигорск, Севкавгипроводхоз, с. 301-304.

Кочков, Н.В., Рянжин, С.В. (2016) Методика морфометрических характеристик озер с использованием спутниковой информации, *Водные ресурсы*, т. 43, № 1, с. 18-23, doi: 10.7868/S0321059616010107.

Крыленко, И.Н., Сурков, В.В., Тарбеева, А.М., Крыленко, И.В. (2008) Морфология озера Сылтран (бассейн р. Баксан) и оценка его прорывоопасности, Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита, *Труды Междунар. конф. 22-29 сентября 2008 г.*, СКГВХ, Пятигорск. с. 305-308.

Мочалов, В.П., Цукерман, И.Г. (1982) Методы расчета гидрографов паводков при прорыве горных озер, *Селевые потоки*, Сборник 6, Казахский региональный НИИ, М., Гидрометеиздат, с. 34-50.

Муравейский, С.Д. (1960а) *Реки и озера. Гидробиология*. Сток, М., Географгиз, 125 с.

Муравейский, С.Д. (1960b) *Реки и озера. Морфометрия Глубокого озера*, М., Географгиз, с. 202-219.

Муравейский, С.Д. (1960c) *Реки и озера. О съемке озер и использовании карт при морфометрических вычислениях*, М., Географгиз, с. 126-140.

Рекомендации Р 52.08.874-2018. *Определение гидрографических характеристик картографическим способом* (2018), СПб, 170 с.

Свирепов, С.С. (2020) Систематизация прорывоопасных озер на территории горного Алтая (с помощью методов ДЗЗ), *4-е Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению*, СПб., с. 353-357.

Сейнова, И.Б., Золотарев, Е.А. (2001) *Ледники и сели Приэльбрусья (Эволюция оледенения и селевой активности)*, М., Научный мир, 203 с.

Сулейманов, И.А.-Г., Рагимова, А.С. (2008) Модель приближенного определения объемов водо- и селехранилищ малоизученных створов горных рек, *Труды Всеросс. конф. по селям 26-28 октября 2005 г.*, М., ВГИ, с. 74-76.

Тавасиев, Р.А., Тебиева, Д.И. (2013) Приледниковые озера Северной Осетии и опасность их прорыва, *Геориск*, № 3, с. 30-33.

Тукеев, О.В. (2002) *Селевые явления Памира: катастрофы, закономерности, прогноз*, М., 176 с.

Хуан, Ж.Ц., Ли, В.А. (2010) Анализ опасных геологических процессов, вызванных Вэньчуаньским землетрясением 12 мая 2008 года в Китае, *Геориск*, № 1, с. 14-23.

Чеботарев, А.И. (1978) *Гидрологический словарь*, Л., Гидрометеиздат, 308 с.

Яблоков, А.А. (2009) *Сели Таджикистана*, Душанбе, 87 с.

Schweizer, W. (1957) Gletscherseen, *Geographica Helvetica*, vol. 12, no. 2, pp. 81-87.

References

Akulov, V.V. (1948) Nekotorye nablyudeniya nad sostoyaniem Sarezskogo ozera v 1946 g. [Some observations on the state of Lake Sarez in 1946], *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, vol. 80, no. 3, pp. 246-258.

Anahaev, K.K. (2022) O distancionnom opredelenii osnovnykh harakteristik zaval'nykh vodoemov [On remote determination of the main characteristics of dammed water bodies], *Prirodoobustrojstvo*, no. 2. pp. 94-98, doi: 10.26897/1997-6011-2022-2-94-98.

Anahaev, K.N. (1997) *Sovershenstvovanie konstrukcij, metodov raschetnogo obosnovaniya i proektirovaniya protivofil'tracionnykh ustrojstv gruntovykh plotin* [Improvement of structures, methods of calculation substantiation and design of impervious devices of soil dam], Doctor's thesis, Moscow, Russia, 521 p.

Anahaev, K.N. (1998) *Fil'tracionnye raschety zemlyanykh plotin* [Filtration calculations of earth dams], Nalchik, Russia, 34 p.

Anahaev, K.N., Adzhiev, A.H., Chuprinin, S.L. (2003) O nekotorykh novykh protivoselevykh meropriyatiyah [About some new anti-mudflow measures], *Zashchita narodnohozyajstvennykh ob'ektov ot vozdejstviya selevykh potokov. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii po selyam 17-21 noyabrya 2003 g. Pyatigorsk* [Protection of national economic facilities from the impact of mudflows. Materials of the International conference mudflows November 17-21, 2003 Pyatigorsk], Novocherkassk – Pyatigorsk, Russia, pp. 81-84.

Anisimov, D.A. (2014) Metodicheskie voprosy informacionnogo obespecheniya sozdaniya banka dannykh v zadache chislennoj ocenki podverzhennosti geosistem opasnym prirodnykh processam [Methodological issues of information support for the creation of a data bank in the problem of numerical assessment of the exposure of geosystems to hazardous natural processes], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, no. 6 (62), pp. 66-73.

Bogachenko, E.M., Il'ichev, Yu.G., Zimnickij, A.V. (2008) Issledovanie glyacial'nykh ozer Priel'brus'ya na predmet ih potencial'noj selevoj opasnosti [Study of the glacial lakes of the Elbrus region for their potential mudflow hazard], *Trudy Vserossijskoj konferencii po selyam 26-28 oktyabrya 2005g.* [Proceedings of the All-Russian Conference on Mudflows October 26-28, 2005], Moscow, Russia, pp. 175-181.

Bogoslovskij, B.B. (1960) *Ozerovedenie* [Limnology], Moscow State University, Russia, 332 p.

Bronshtejn, I.N., Semendyaev, K.A. (1980) *Spravochnik po matematike* [Handbook of Mathematics], Moscow, Russia, 915 p.

Vereshchagin, G.Yu. (1930) Metody morfometricheskoj harakteristiki ozer [Methods for the morphometric characterization of lakes], *Trudy Oloneckoj*

nauchnoj ekspedicii [Proceedings of the Olonets scientific expedition], vol. 2, issue 1, Leningrad, Russia, 115 p.

Vinogradov, Yu.B. (1977) *Glyacial'nye proryvnye pavodki i selevye potoki* [Glacial outburst floods and mudflows], Leningrad, Russia, 155 p.

Vinogradov, Yu.B., Vinogradova, T.A. (2008) *Sovremennye problemy gidrologii* [Modern problems of hydrology], Moscow, Russia, 319 p.

Efremov, Yu.G., Panov, V.D., Bazelyuk, A.A., Lur'e, P.M. (2010) *Ozera Pred-kavkaz'ya i Bol'shogo Kavkaza* [Lakes of Ciscaucasia and the Greater Caucasus], Rostov-on-don, Russia, 239 p.

Zimnickij, A.V. (2005) *Formirovanie, rasprostranenie i dinamika prilednikovyh ozer Zapadnogo i Central'nogo Kavkaza* [Formation, distribution and dynamics of glacial lakes in the Western and Central Caucasus], Candidate's thesis, Krasnodar, Russia, 186 p.

Zimnickij, A.V., Nikolajchuk, A.V. (2006) *Sovremennoe oledenenie i prilednikovye ozera v verhov'yah Malki (Central'nyj Kavkaz)* [Modern glaciation and periglacial lakes in the upper reaches of the Malka (Central Caucasus)], *Izmenenie prirodnoj sredy na rubezhe tysyacheletij. Trudy Mezhdunarodnoj elektronnoj konferencii. Tbilisi* [Changes in the natural environment at the turn of the millennium. Proceedings of the International Electronic Conference. Tbilisi], Moscow, Russia, pp. 35-40.

Keremkulov, V.A. (1985) *Morfometricheskie karakteristiki i klassifikaciya morenyh ozer* [Morphometric characteristics and classification of moraine lakes], *Selevye potoki*, Digest 9, Moscow, Russia, pp. 36-47.

Kidyayeva, V.M., Krylenko, I.N., Krylenko, I.V., Petrakov, D.A., Chernomorec, S.S. (2013) *Kolebaniya urovnya vody v gornyh lednikovyh ozerah Priel'brus'ya* [Fluctuations in the water level in the mountain glacial lakes of the Elbrus region], *Georisk*, no. 3, pp. 20-27.

Kodyaev, G.V. (1973) *Morfometricheskaya karakteristika ozera Issyk-Kul'* [Morphometric characteristics of Lake Issyk-Kul], *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, vol. 105, no. 4, pp. 362-365.

Konovalov, V.G. (2008) *Distancionnyj monitoring proryvoопасnyh vysokogornyh ozer na Pamire* [Remote monitoring of outburst-prone high-mountain lakes in the Pamirs], *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Trudy Mezhdunarodnoj konferencii 22-29 sentyabrya 2008 g.* [Mudflows: catastrophes, risk, forecast, protection. Proceedings of the International Conference 22-29 September 2008], Pyatigorsk, Russia, pp. 301-304.

Kochkov, N.V., Ryanzhin, S.V. (2016) *Metodika morfometricheskikh karakteristik ozer s ispol'zovaniem sputnikovoj informacii* [Method of morphometric characteristics of lakes using satellite information], *Vodnye resursy*, vol. 43, no. 1, pp. 18-23, doi: 10.7868/S0321059616010107.

Krylenko, I.N., Surkov, V.V., Tarbeeva, A.M., Krylenko, I.V. (2008) Morfologiya ozera Syltran (bassejn r. Baksan) i ocenka ego proryvoopasnosti [Morphology of Lake Syltran (basin of the Baksan River) and assessment of its outburst hazard], *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita. Trudy Mezhdunarodnoj konferencii 22-29 sentyabrya 2008 g.* [Mudflows: catastrophes, risk, forecast, protection. Proceedings of the International Conference 22-29 September 2008], Pyatigorsk, Russia, pp. 305-308.

Mochalov, V.P., Cukerman, I.G. (1982) Metody rascheta gidrografov pavodkov pri proryve gornyh ozer [Methods for Calculating Flood Hydrographs in the Outburst of Mountain Lakes], *Selevye potoki*, Digest 6, Moscow, Russia, pp. 34-50.

Muravejskij, S.D. (1960a) *Reki i ozera. Gidrobiologiya. Stok* [Rivers and lakes. Hydrobiology. Runoff], Moscow, Russia, 125 p.

Muravejskij, S.D. (1960b) *Reki i ozera. Morfometriya Glubokogo ozera* [Rivers and lakes. Morphometry of the Deep Lake], Moscow, Russia, pp. 202-219.

Muravejskij, S.D. (1960s) *Reki i ozera. O s"emke ozer i ispol'zovanii kart pri morfometricheskikh vychisleniyah* [Rivers and lakes. About surveying lakes and using maps in morphometric calculations], Moscow, Russia, pp. 126-140.

Rekomendacii R 52.08.874-2018. Opredelenie gidrograficheskikh harakteristik kartograficheskim sposobom [Recommendations R 52.08.874-2018. Determination of hydrographic characteristics by cartographic method] (2018) St. Petersburg, Russia, 170 p.

Svirepov, S.S. (2020) Sistematizaciya proryvoopasnyh ozer na territorii gornogo Altaya (s pomoshch'yu metodov DZZ) [Systematization of outburst-prone lakes on the territory of the Altai Mountains (using remote sensing methods)], *4-e Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya ot poznaniya k mirovozreniyu* [4th Vinogradov Readings. Hydrology from knowledge to worldview], St. Petersburg, Russia, pp. 353-357.

Sejnova, I.B., Zolotarev, E.A. (2001) *Ledniki i seli Priel'brus'ya (Evoluciya oledeneniya i selevoj aktivnosti)* [Glaciers and Mudflows of the Elbrus Region (Evolution of Glaciation and Mudflow Activity)], Moscow, Russia, 203 p.

Sulejmanov, I.A.-G., Ragimova, A.S. (2008) Model' priblizhennogo opredeleniya ob"emov vodo- i selekhranilishch maloizuchennyh stvorov gornyh rek [Model for Approximate Determination of Volumes of Water and Mudflow Reservoirs of Little-Studied Alignments of Mountain Rivers], *Trudy Vserossijskoj konferencii po selyam 26-28 oktyabrya 2005 g.* [Proceedings of the All-Russian Conference on Mudflows October 26-28, 2005], Moscow, Russia, pp. 74-76.

Tavasiev, R.A., Tebieva, D.I. (2013) Prilednikovye ozera Severnoj Osetii i opasnost' ih proryva [Glacial lakes of North Ossetia and the danger of their outburst], *Georisk*, no. 3, pp. 30-33.

Tukeev, O.V. (2002) *Selevye yavleniya Pamira: katastrofy, zakonomernosti, prognoz* [Mudflow phenomena in the Pamirs: catastrophes, regularities, forecast], Moscow, Russia, 176 p.

Huan, Zh.C., Li, V.A. (2010) Analiz opasnyh geologicheskikh processov, vyzvannyh Ven'chuan'skim zemletryaseniem 12 maya 2008 goda v Kitae [Analysis of hazardous geological processes caused by the May 12, 2008 Wenchuan earthquake in China], *Georisk*, no. 1, pp. 14-23.

Chebotarev, A.I. (1978) *Gidrologicheskij slovar'* [Hydrological dictionary], Leningrad, Russia, 308 p.

Yablokov, A.A. (2009) *Seli Tadzhikistana* [Mudflows in Tajikistan], Dushanbe, Tajikistan, 87 p.

Schweizer, W. (1957) *Gletscherseen*, *Geographica Helvetica*, vol. 12, no. 2, pp. 81-87.

Статья поступила в редакцию (Received): 03.10.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.10.2022.

Принята к публикации (Accepted): 20.10.2022.

Для цитирования / For citation:

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В., Бестужева, А.С., Анахаева, Х.К. (2022) Об определении гидрогеофизических характеристик прорывоопасных водных объектов, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 4, с. 441-476, doi:10.21513/2410-8758-2022-4-441-476.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V., Bestusheva, A.S., Anakhaeva, H.K. (2022) On determination of hydrogeophysical characteristics breakthrough water bodies, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 4, pp. 441-476, doi:10.21513/2410-8758-2022-4-441-476.