

Валерий Николаевич Дробышев

Владикавказский научный центр Российской академии наук, комплексный научно-исследовательский отдел, научный сотрудник, Россия, Владикавказ, e-mail: dvn4444@rambler.ru

Деляра Иосифовна Тебиева

Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, заведующая кафедрой физической и социально-экономической географии, доцент, кандидат географических наук.

Харитон Майорович Хубаев

Владикавказский научный центр Российской академии наук, комплексный научно-исследовательский отдел, научный сотрудник, Россия, Владикавказ.

Хаджи-Мурат Заурбекович Торчинов

Владикавказский научный центр Российской академии наук, отдел проектов и программ, главный специалист, Россия, Владикавказ.

Деградация оледенения Казбеко-Джимарайского горного узла и отдельных ледников в бассейнах рек Урух, Ардон, Фиagdон, Гизельдон и Геналдон (территория РСО-А)

Аннотация. Работа направлена на исследование темпов деградации оледенения Центрального Кавказа в пределах Горной Осетии с охватом юго-восточных склонов Казбеко-Джимарайского массива на территории Грузии. Основным методом был выбран сравнительный анализ площадей оледенения, отображенных на государственных топографических картах М 1 : 50 000, выполненных на основе аэрофотосъемки 1957 года и дешифрированных площадях оледенения на космических снимках GOOGL 2020 года для той же территории. В процессе работы были применены математические приемы, позволившие оценить масштабы деградации площади дневной поверхности отдельных ледово-фирновых образований сопровождать оценкой их объемов и средних мощностей. Полученные результаты для территории Горной Осетии хорошо согласуются с результатами проведения аналогичных работ на других локальных площадях, как на территории России, так и за рубежом, что свидетельствует о глобальности распространения процесса распада горного оледенения, обусловленном потеплением климата планеты.

Ключевые слова: Кавказ, ледник, Казбеко-Джимарайский массив, гомеоморфизм, биекция, деградация оледенения, климат.

Valery N. Drobyshev

Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Integrated Research Department, Researcher, Russia, Vladikavkaz, e-mail: dvn4444@rambler.ru

Delyara I. Tebieva

K.L. Khetagurov North Ossetian State University, Associate Professor, Head of the Department of Physical and Socio-Economic Geography, Ph.D., Russia, Vladikavkaz.

Khariton M. Khubaev

Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Integrated Research Department, Researcher, Russia, Vladikavkaz.

Hadji-Murat Z. Torchinov

Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Department of Projects and Programs, Chief Specialist, Russia, Vladikavkaz.

Degradation of glaciation of the Kazbek-Dzhimarai mountain cluster and individual glaciers in the river basins Uruk, Ardon, Fiagd, Gizeld and Genald (territory of North Ossetia-Alania)

Abstract. The work is aimed at studying the rate of degradation of glaciation in the Central Caucasus within Mountain Ossetia, covering the southeastern slopes of the Kazbek-Dzhimarai massif on the territory of Georgia. The main method was the comparative analysis of glacier areas displayed on state topographic maps M 1 : 50,000, made on the basis of aerial photography in 1957 and interpreted glaciation areas on space images of GOOGL 2020 for the same territory. In the course of the work, mathematical techniques were applied, which allowed the assessment of the scale of degradation of the day surface area of individual ice-firn formations to be accompanied by an assessment of their volumes and average thicknesses. The results obtained for the territory of Mountain Ossetia are in good agreement with the results of similar work in other local areas, both in Russia and abroad, which indicates the globality of the spread of the decay of mountain glaciation caused by the warming of the planet's climate.

Keywords: Caucasus, glacier, Kazbek-Dzhimarai massif, homeomorphism, bijection, degradation of glaciation, climate.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КАВКАЗСКОГО РЕГИОНА

Между Черным и Каспийским морями расположилось крупное геолого-тектоническое образование – Кавказ, представляющий собой обширное и сложное горное сооружение. Основная орографическая структура Кавказа – Главный Кавказский хребет, протяженностью около 1 200 километров в направлении ЮВ–СЗ, некоторые вершины которого вздымаются на высоты, превышающие 5 000 метров. С севера Главный хребет сопровождается несколькими хребтами меньшего порядка. Среди них выделяется соседствующий Боковой хребет, высоты вершин которого зачастую превосходят высоты вершин Главного хребта. Далее на севере расположилась гряда красивых скальных массивов, сложенных известняковыми породами светлого цвета, разделенных глубокими ущельями каньонного типа, прорезанными с юга на север горными реками. Совокупность этих массивов объединена в целостную структуру – Скалистый хребет, высоты которого достигают 3 000 и даже 3 500 метров над уровнем моря. Еще севернее расположились аналогичные сопровождающие структуры Пастбищного и Лесистого хребтов, рельеф которых становится все менее выразительным. Предгорная равнина окаймляет с севера горное сооружение Кавказа (рис. 1).

Климатические условия на больших высотах массивов Главного и Бокового хребтов, достигающих пределов криосферы, способствуют накоплению снежных осадков и образованию обширных полей «вечных снегов», сползающих в долины языками ледников. Высотная граница криосферы, к которой приурочена так называемая «фирновая

линия», разграничивающая зоны питания и таяния у ледников, – величина не постоянная и зависит от многих факторов. Для различных районов Большого Кавказа ее оценки приходится на высоты 3 500–4 000 метров. На фоне ее изменчивости в глобальных климатических поясах можно отследить ее зависимость и от микроклиматических условий, регулируемых экспозицией склонов, особенностями гипсометрии участка горной территории, влияющими на вертикальную составляющую движения воздушных масс. Изменения этого параметра происходят и во времени, в зависимости от глобальных климатических колебаний с различными периодами в сторону похолодания или потепления.

С высотным положением границы криосферы напрямую связано поведение ледово-фирновых образований. Вязко-пластичные деформации ледово-снежных масс позволяют перемещаться языкам ледников на значительные расстояния вниз по долине, выпавшая рыхлая отложения оседей по бортам долины и речной аллювий, образуя из этого материала по своим бокам ровные гряды – боковые морены. Такие гряды или их фрагменты встречаются на бортах долин гораздо ниже современного положения ледниковых языков, что свидетельствует о былой масштабности оледенения конкретной территории [5].

Изучение стадийности развития ледово-снежного покрова горных областей в прошлом представляется интересной и актуальной задачей, так как ледники являют собой естественные хранилища пресной воды, запасы которой необходимо учитывать в интересах хозяйственной деятельности человека [13, 15]. Первые сведения о ледниках Кавказа, начиная с середины XIX в., принадлежали путешественникам и исследователям, преимущественно иностранцам, – Г. Абиху, Г. Мерцбахеру,

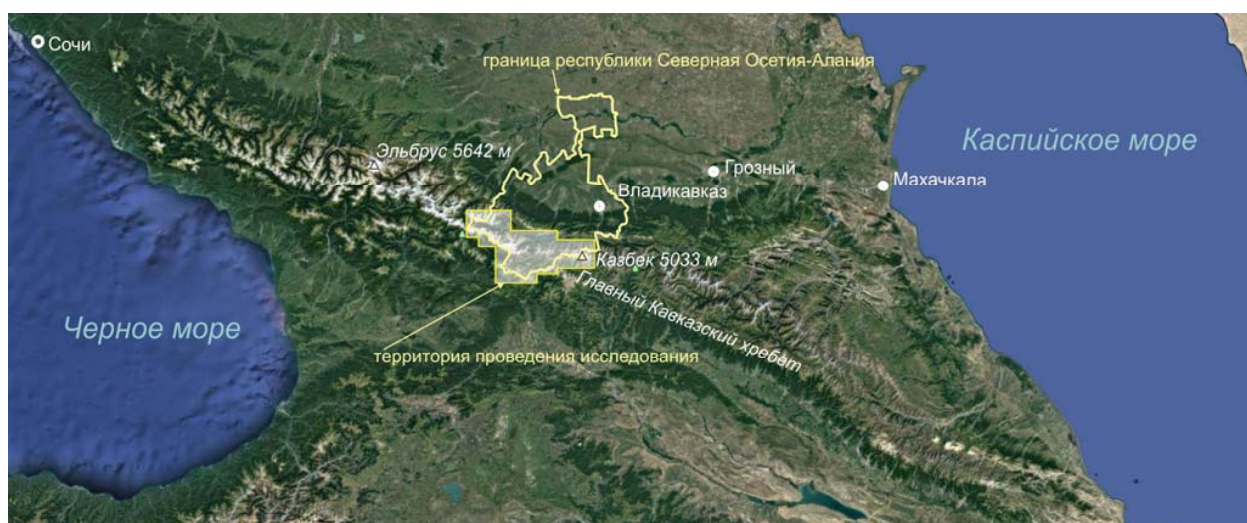


Рис. 1. Экспликация границ территории исследования деградации ледникового покрова на космическом снимке Большого Кавказа

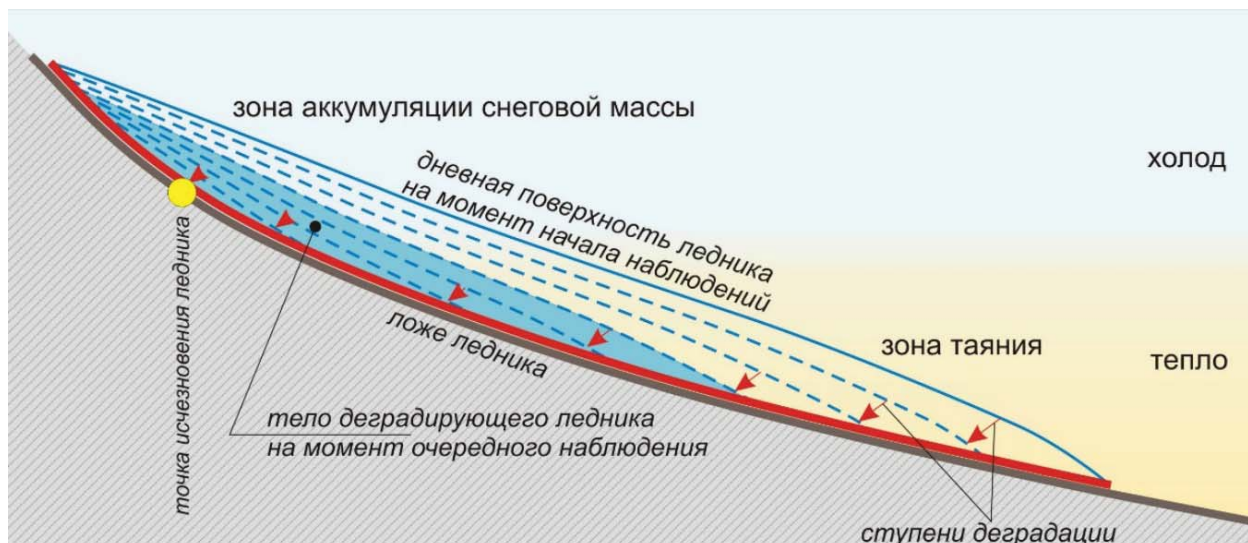


Рис. 2. Типовая схема продольного сечения тела ледово-фирнового образования и этапы его деградации

Г. Бурмейстеру, М. Фон Деши и другим. Это были разрозненные описания ледников, выполняемые попутно с другими исследованиями. В конце XIX – начале XX в. много экспедиций по исследованию ледников Кавказа было организовано Русским географическим обществом и его Кавказским отделом. С 1883 г. на Кавказе началось выполнение инструментальных топографических съемок гляциальных областей ледников под руководством военного топографа А.В. Пастухова. К 1911 году накопленный материал был опубликован в первом каталоге ледников всего Кавказа, составленном участником топографических работ К.И. Подозёрским. Более детальные исследования ледников с применением расширенного спектра методик проводились в периоды второго Международного полярного года (МППГ) (1932–1933). Затем, спустя четверть века, работы возобновились под эгидой Международного геофизического года (МГГ) (1957–1958), когда были организованы круглогодичные работы на ледниках Эльбруса.

В 1965 году были начаты работы по проекту Международного гидрологического десятилетия (МГД) (1965–1974), основной темой которых было изучение колебаний баланса массы ледников в связи с изменениями климата. Круглогодичные наблюдения велись на эталонных ледниках – Марухском и Джанкуат. В 1957 г. была проведена аэрофотосъемка Кавказа, которая послужила основой для каталогизации всех ледников Кавказа, завершившейся к 1977 г. В настоящее время исследования ледников Кавказа продолжают силами Института географии РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова и других организаций [5, 6, 7].

Современное оледенение на Кавказе распределено неравномерно. Наибольшее количество ледников, общая площадь которых составляет около 70 % от площади оледенения всего Большого Кавказа сосредоточено на территории Центрального Кавказа – наиболее возвышенной части горного

сооружения, расположенной между вулканическими вершинами-пятитысячниками Казбеком и Эльбрусом. Высоты многих вершин этого района превышают 4 500 метров, а некоторых – 5 000 метров над уровнем моря. Общая площадь оледенения Центрального Кавказа оценивалась по состоянию на 1957 год – год проведения аэрофотосъемки – в 980 км² [2]. На Западном Кавказе, из-за относительно небольшой высоты горных хребтов, оледенение представлено небольшими долинными, каровыми и висьячими ледниками общей площадью около 330 км². Ледово-фирновые образования на Восточном Кавказе развиты слабо. Суммарная площадь каровых, карово-долинных и висьячих ледников, типичных для данной территории, составляла, по данным на тот же 1957 год, около 100 км². Площадь ледово-фирнового покрова всего Большого Кавказа, с учетом ледников южного склона, оценивалась величиной, немногим более 1 400 км².

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ОЛЕДЕНЕНИЯ

Территория горной части Осетии полностью находится в пределах Центрального Кавказа и содержит в своем составе несколько крупных центров оледенения. Вершины и гребни высоко вздымающегося Казбекско-Джимарайского горного узла прикрыты мощными фирновыми полями, стекающими радиально во все стороны языками крупных долинных ледников. Общая площадь оледенения горного узла по Каталогу ледников составляла 70,6 км², уступая лишь Эльбрусскому комплексу оледенения, площадь которого оценивалась в 120 км². Методически проводимые наблюдения за состоянием оледенения Кавказа в течение XX столетия констатируют его неуклонную деградацию. Такая тенденция наблюдается по всем горным районам земного шара [15, 17–21]. Основываясь на данных из рабо-

ты К.И. Подозёрского 1911 года и имея сопоставимый картографический материал (аэрофотосъемка 1957 года) для этой же территории, опубликованный к 1975 году, мы получили для этого периода величину сокращения площади ледникового покрова по горной системе Большого Кавказа – на 790 км², по Центральному Кавказу – на 487 км². В течение последних десятилетий XX века стало доступным наблюдение за состоянием оледенения из космоса. Не прекращаются по настоящее время и наземные исследовательские работы на репрезентативных для Кавказа ледниках Марухском и Джанкуат [7]. Результаты сходятся в одном: тенденция к деградации ледово-фирнового покрова Кавказа неуклонно сохраняется [5, 9].

Значительное сокращение суммарной площади оледенения – более чем на 40 % – можно рассматривать в качестве индикатора уменьшения средней толщины рассматриваемых ледниковых тел на такую же величину [8, 11]. На *рисунке 2* схематично показан процесс деградации типичного, линзовидного ледникового тела, наиболее толстого в срединных частях и утончающегося по краям. Начальному моменту наблюдений соответствует определенная площадь поверхности ледника и определенный объем его тела. Потеря ледником своего объема влечет уменьшение площади поверхности тела. Факт исчезновения льда обнуляет площадь поверхности.

Изучением закономерностей связи площади дневной поверхности ледника с объемом его тела занимались и занимаются многие исследователи [16, 22]. Спектр методик, позволяющих детализировать рельеф ложа ледника, не так велик. Наиболее трудоемким и дорогостоящим является бурение скважин. Метод позволяет получать достоверные данные о мощности льда в точке бурения, однако охват больших площадей ледниковой поверхности наблюдательной сетью скважин с целью получения цифровой модели его тела технологически невыполним в условиях высокогорья. Применение геофизических методов дистанционного зондирования поверхности ложа ледника, обеспечивающих получение косвенных данных о мощностях льда и фирна, изменяющихся по пространству, имеет попеременный успех. Методики электроразведки плохо применимы для решения такой задачи из-за неприемлемо больших погрешностей при работе с ледниковой средой. Акустические методы также требуют проведения работ непосредственно на поверхности ледово-фирнового образования, которое нередко имеет сложный, труднопроходимый рельеф в своих высокогорных областях [7]. В последние десятилетия большое распространение получил метод радиозондирования, выполняемого с борта летательного аппарата [3]. Метод позволяет за короткое время охватить измерениями большую площадь оледенения. Сопровождающее «назем-

ное» радиозондирование, проводимое на локальном участке поверхности ледника, подкрепляет и конкретизирует общий массив информации. В результате компьютерной обработки радиолокационных данных в комплексе с топографическими данными поверхности ледника получается цифровая модель тела ледово-фирнового образования, вычисляется его объем и прочие геометрические характеристики. Такие работы были проведены для 64 % площади оледенения всего Кавказа. На основе этого материала были выстроены диаграммы зависимостей объемов ледово-фирновых образований различных типов от занимаемой ими площади. Все они удовлетворительно описываются эмпирической степенной закономерностью [10, 13]:

$$V = kS^p; \quad (1)$$

где k и p – некоторые коэффициенты, незначительно изменяющиеся в зависимости от типа ледника и его локации.

ТОПОЛОГИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К АНАЛИЗУ БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДОВО-ФИРНОВОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Рисунок 3 поясняет закономерности соотношения линейных размеров трехмерного тела с его объемом и двумерными характеристиками, такими как: сечение, площадь поверхности и т. д. Уменьшение габаритов тела сложной конфигурации при самоподобной трансформации в 2 раза влечет уменьшение его двумерных характеристик в 4 раза, а объема – в 8 раз. Учет этой закономерности применительно к ледникам сводится к определению его одномерной характеристики, которую можно легко получить, исходя из условия гомеоморфизма сложного тела ледника и простого геометрического тела, например – куба, объем которого равен объему тела ледника. Рассматривая отображение этих двух образов-множеств как биективное, при котором каждому элементу одного множества соответствует ровно один элемент другого множества (например: 1 м³), принимается, что пространства, связанные гомеоморфизмом, топологически неразличимы [4]. Учитывая изложенные условия, можно из величины площади дневной поверхности каждого ледника извлечь квадратный корень. Это будет условно одномерная характеристика данного ледника.

Исходя из вышеизложенных фактов, можно дать количественную оценку состояния ледникового покрова на территории Горной Осетии (ГО), сформированную к 2020 году. Для проведения такого анализа были использованы соответствующие топографические планшеты масштаба 1: 50 000, выполненные по аэрофотосъемке 1957 года и космические снимки GOOGL 2020 года (*рис. 4*).

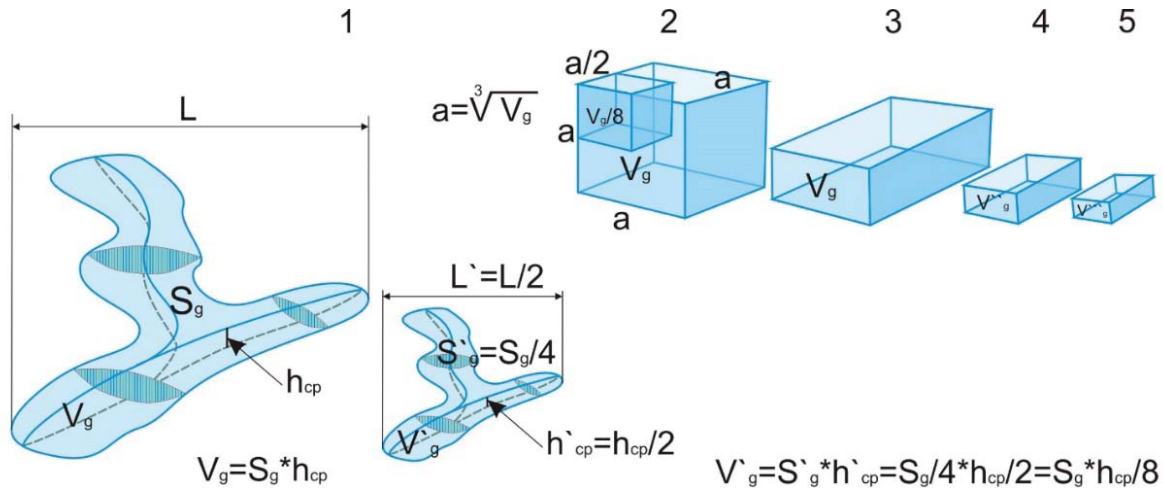


Рис. 3. Цепочка гомеоморфных преобразований ледникового тела сложной конфигурации к простой геометрической форме (1-2-3) с последующим подобным масштабированием (3-4-5)

Действия по приведению изображений местности различного времени к единому масштабу и их совмещение по надежным опознавательным пунктам, таким как вершины гор, старые капитальные строения, характерные изгибы хребтов и т. д., позволили получить векторные контуры для каждого ледника или фирнового поля в двух вариантах: для 1957 года и для 2020 года. Вычисление площадей полученных сложных замкнутых контуров ледниковых образований выполнялось в программе «LpSquare50» по каждому варианту отдельно. Результаты сведены в таблицу 1.

Исходя из объективной предпосылки выделения области Центрального Кавказа, как наиболее поднятой, вершины и хребты которой расположены в высотном ярусе более 3 800–4 000 метров над уровнем моря, можно допустить, что и оледенение в границах области, несмотря на сложность конфигурации в плане и гипсометрии, развито равномерно по простираюнию Главного Кавказского хребта. По топографической карте М 1 : 50 000 для территории Горной Осетии, южных и восточных склонов Казбеко-Джимарайского массива (Верховья реки Терек, Грузия) было построено 137 контуров отдельных объектов оледенения общей площадью: $S_{ГО(1957)} = 227,3 \text{ км}^2$.

В статье В.Д. Панова «Новые данные о современном оледенении Кавказа» [2], величина площади оледенения Центрального Кавказа (ЦК) оценивалась на 1957 год в: $S_{ЦК(1957)} = 980 \text{ км}^2$, которыми охватывался объем льда: $V_{ЦК(1957)} = 68 \text{ км}^3$. Соотношение площадей оледенения – Центрального Кавказа и Горной Осетии – позволяет получить, при условно равномерном рассредоточении ледниковых образований, суммарную оценку объемов ледово-фирновых масс, соответствующих исследуемой площади Горной Осетии и участкам Казбеко-Джимарайского массива на территории

Грузии. В результате решения пропорции получается величина: $V_{ГО(1957)} = 15,8 \text{ км}^3$. Так было в 1957 году.

Для определения доли от общего объема льда: ($V_{ГО(1957)}$) в отдельном ледово-фирновом i -образовании, для которого определена площадь дневной поверхности: $S_{i(1957)}$ по карте М 1 : 50 000 было использовано несколько вычислительных приемов.

Логика расчетного механизма следующая: из величины площади дневной поверхности отдельного ледового i -объекта: $S_{i(1957)}$ извлекается квадратный корень – одномерная величина $a = \sqrt[2]{S_{i(1957)}}$, равная стороне квадрата площадью: $S_{i(1957)}$, биективно сопряженного с площадью поверхности ледового i -объекта. Возведение линейного параметра (a) в третью степень образует величину объема куба ($V_{i(1957)}^1$) со стороной (a):

$$V_{i(1957)}^1 = a^3 = (\sqrt[2]{S_{i(1957)}})^3 = S_{i(1957)}^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

В результате выполнения такой операции для всех 137 объектов образуется упорядоченная совокупность величин объемов 137 виртуальных тел кубической формы. Суммарный объем всех кубов можно обозначить, изменив нижний индекс:

$$V_{(1957)}^1 = \sum_{i=1}^{137} S_{i(1957)}^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Отношение ($V_{i(1957)}^1$) к суммарному объему оледенения $V_{ГО(1957)} = 15,8 \text{ км}^3$, рассчитанному выше по опубликованным данным на 1957 год [2], будет справедливо для любого из 137 наблюдаемых объектов. Т. е.:

$$\frac{V_{i(1957)}^1}{V_{ГО(1957)}} = \frac{V_{i(1957)}^1}{V_{i(1957)}} = \frac{1}{k}; k=0,029684 \quad (4)$$

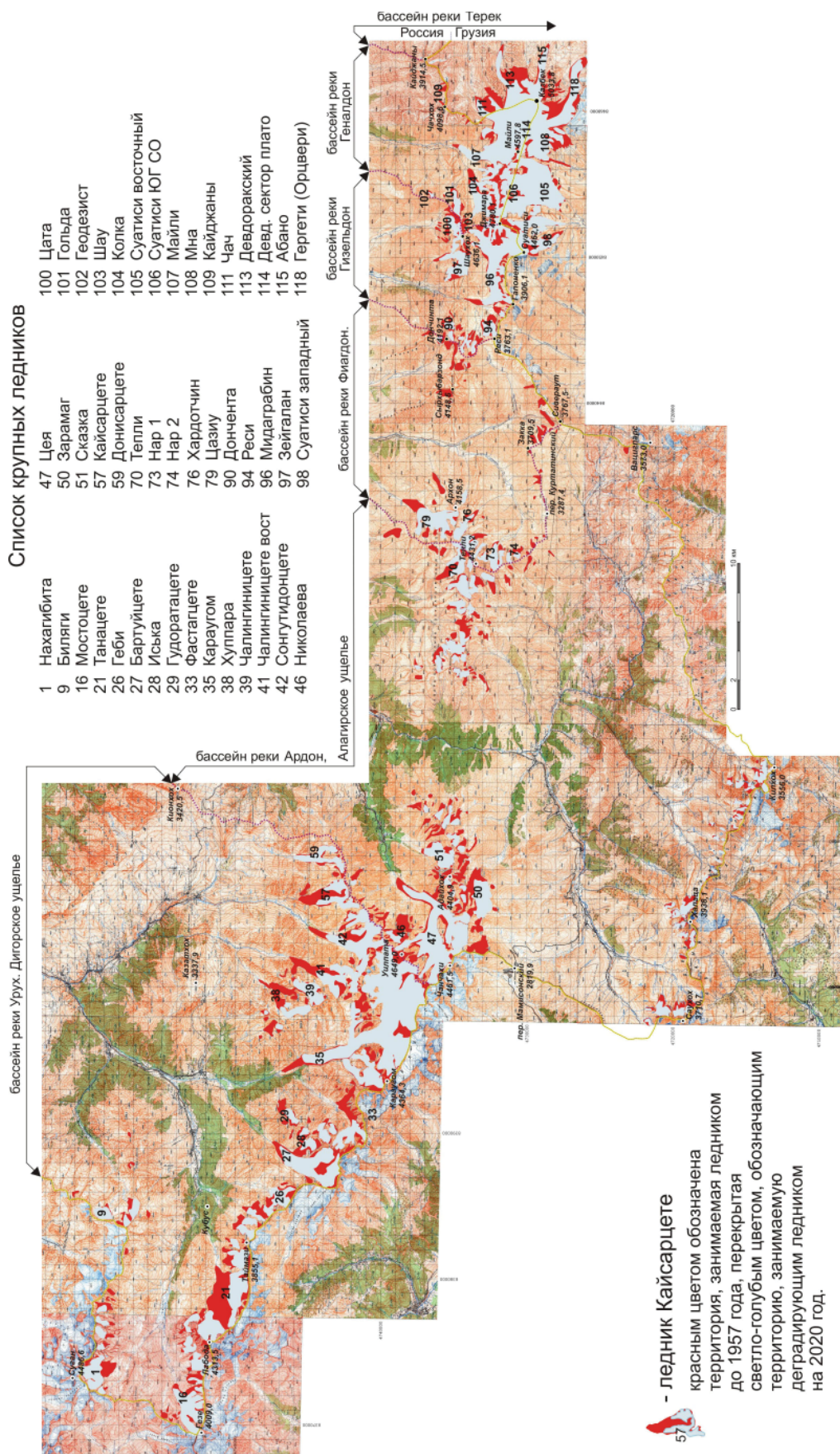


Рис. 4. Деградация отдельных ледово-фирновых образований распространённых по Казбеко-Джигмарайскому горному узлу и бассейнам р.р. Урух, Ардон, Фиагдон, Гизельдон и Геналдон (территория РСО-А) за период 1957–2020 годы

Таблица 1

Основные количественные параметры отдельных ледово-фирновых образований распространённых по Казбеко-Джигмарскому горному узлу и бассейнам рр. Урух, Ардон, Фиагон, Гизельдон и Геналдон (территория РСО-А)

№	Название ледника	Экспозиция	Группа	S1 (км²)			S2 (км²)			S2/S1				
				1957	1957	2020	1957	1957	2020	h (м)	2020	h (м)	2020	
1	Нахалбита	с	ДД	0,1567	0,0016	11,7488	0,0012	10,0582	0,7329	0,0012	10,0582	0,7329	10	11
2	2,8860	с	ДД	2,8860	0,1455	50,4271	0,0727	40,0191	6,2998	0,0727	40,0191	6,2998	10	11
3	4,4486	с	ДД	4,4486	0,0026	13,1925	0,0008	9,0249	4,6800	0,0008	9,0249	4,6800	10	11
4	5,0046	с	ДД	5,0046	0,0089	19,8906	0,2870	15,9034	6,3399	0,2870	15,9034	6,3399	10	11
5	6,2783	с	ДД	6,2783	0,0044	15,6589	0,1888	12,8967	6,7833	0,0044	15,6589	6,7833	10	11
6	6,5410	с	ДД	6,5410	0,0118	21,8331	0,1703	0,0021	12,2489	0,1703	0,0021	12,2489	10	11
7	6,1693	с	ДД	6,1693	0,0021	12,2139							10	11
8	0,0681	с	ДД	0,0681	0,0005	7,7469							10	11
9	0,7920	с	ДД	0,7920	0,0209	26,4175	0,9889	0,0169	24,6026	0,8673	0,0169	24,6026	10	11
10	0,0623	с	ДД	0,0623	0,0005	7,4075							10	11
11	1,2377	с	ДД	1,2377	0,0409	33,0234	0,1713	0,0021	12,2839	0,1384	0,0021	12,2839	10	11
12	0,0671	с	ДД	0,0671	0,0005	7,6914							10	11
13	0,0671	с	ДД	0,0671	0,0005	7,6914							10	11
14	0,0399	с	ДД	0,0399	0,0002	5,8561							10	11
15	0,2364	с	ДД	0,2364	0,0034	14,4338							10	11
16	3,8882	с	ДД	3,8882	0,2274	58,5171	3,1360	0,1648	52,5865	0,8070	0,1648	52,5865	10	11
17	1,6800	с	ДД	1,6800	0,0635	36,2444	0,9321	0,0267	28,6990	0,5615	0,0267	28,6990	10	11
18	0,6471	с	ДД	0,6471	0,0155	23,8775	0,4670	0,0095	20,2861	0,7218	0,0095	20,2861	10	11
19	0,6062	с	ДД	0,6062	0,0140	23,1112	0,3639	0,0065	17,9067	0,6003	0,0065	17,9067	10	11
20	0,1751	с	ДД	0,1751	0,0022	12,4227							10	11
21	9,0879	с	ДД	9,0879	0,8132	89,4854	2,5697	0,1223	47,5842	0,2828	0,1223	47,5842	10	11
22	1,7894	с	ДД	1,7894	0,0710	39,6964	1,0197	0,0306	29,9750	0,7502	0,0306	29,9750	10	11
23	0,2880	с	ДД	0,2880	0,0046	15,9303	0,1975	0,0026	13,1925	0,6858	0,0026	13,1925	10	11
24	1,3350	с	ДД	1,3350	0,0458	34,2970	0,7706	0,0201	26,0580	0,5773	0,0201	26,0580	10	11
25	1,2678	с	ДД	1,2678	0,0424	33,4234	0,2647	0,0040	15,2709	0,2087	0,0040	15,2709	10	11
26	1,9742	с	ДД	1,9742	0,0823	41,7080	1,3145	0,0447	34,0335	0,6658	0,0447	34,0335	10	11
27	6,4842	с	ДД	6,4842	0,4901	75,5869	4,7074	0,3032	64,4038	0,7260	0,3032	64,4038	10	11
28	1,7553	с	ДД	1,7553	0,0690	39,3276	0,4369	0,0086	19,6201	0,2489	0,0086	19,6201	10	11
29	1,1842	с	ДД	1,1842	0,0383	32,3016	0,3912	0,0073	18,5649	0,3303	0,0073	18,5649	10	11
30	0,0496	с	ДД	0,0496	0,0003	6,6125	0,0162	0,0001	3,7839	0,3275	0,0001	3,7839	10	11
31	0,8777	с	ДД	0,8777	0,0244	27,8088	0,5400	0,0118	21,8135	0,6153	0,0118	21,8135	10	11
32	0,3084	с	ДД	0,3084	0,0051	16,4857	1,1683	0,0021	12,1787	0,5457	0,0021	12,1787	10	11
33	3,3267	с	ДД	3,3267	0,1801	54,1413	1,4225	0,0504	35,4040	0,4276	0,0504	35,4040	10	11
34	26,2694	с	ДД	26,2694	3,9966	152,1400	22,5350	3,1754	140,9123	0,8578	3,1754	140,9123	10	11
35	1,5948	с	ДД	1,5948	0,0598	37,4859	1,2963	0,0438	33,7392	0,8128	0,0438	33,7392	10	11
36	0,8193	с	ДД	0,8193	0,0220	26,8680	0,0272	0,0001	4,8996	0,0333	0,0001	4,8996	10	11
37	2,4189	с	ДД	2,4189	0,1117	46,1668	0,9818	0,0289	29,4120	0,4059	0,0289	29,4120	10	11
38	1,8390	с	ДД	1,8390	0,0740	40,2434	1,4420	0,0514	35,6453	0,7945	0,0514	35,6453	10	11
39	0,0496	с	ДД	0,0496	0,0003	6,6125							10	11
40	4,1723	с	ДД	4,1723	0,2531	60,6397	1,3340	0,0457	34,2845	0,3197	0,0457	34,2845	10	11
41	6,4209	с	ДД	6,4209	0,4630	75,2173	5,0207	0,3339	65,5126	0,7819	0,3339	65,5126	10	11
42	1,2960	с	ДД	1,2960	0,0439	33,8187	0,7463	0,0191	25,6435	0,5750	0,0191	25,6435	10	11
43	0,2977	с	ДД	0,2977	0,0048	16,1972							10	11
44	1,8020	с	ДД	1,8020	0,0718	39,8473	0,3172	0,0053	16,7181	0,1760	0,0053	16,7181	10	11
45	0,0718	с	ДД	0,0718	0,0018	11,8577	0,2987						10	11
46	0,5342	с	ГЗ	0,5342	0,0116	21,6953	0,1586	0,0019	11,8577	0,2987	0,0019	11,8577	10	11

Условные сокращения

- ДД - Дигоро-Цейский горный массив, бассейн реки Урух;
- ДА - Дигоро-Цейский горный массив, бассейн реки Ардон;
- ТА - Теллинский массив, бассейн реки Ардон;
- ТК - Теллинский массив, бассейн реки Ардон;
- КК - Водораздел в.Реси-в.Нар, бассейн реки Фиагон;

- ГЗ - Водораздел в.Реси-в.Дончента, бассейн реки Гизельдон;
- КДГЗ - Казбеко-Джигмарайский массив, бассейн реки Гизельдон;
- КДГН - Казбеко-Джигмарайский массив, бассейн реки Геналдон;
- КДТ - Казбеко-Джигмарайский массив, бассейн реки Терек;
- ГХА - Зона Главного Кавказского хребта, бассейн реки Ардон;

Или, учитывая равенство (3):

$$V_{i(1957)} = V_{ГО(1957)} * S_{i(1957)}^{\frac{3}{2}} / \sum_{i=1}^{137} S_{i(1957)}^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

В 1-й колонке *таблицы 1* расположены порядковые номера отдельных ледово-фирновых образований, 2-я колонка содержит топонимы крупных ледников, в 3-й колонке указывается преобладающая экспозиция, в 4-й – указаны коды территориальной принадлежности ледника к тому или иному речному бассейну (расшифровка – ниже таблицы). В 5-й и 8-й графах собраны величины площадей в контурах ледово-фирновых объектов по соответствующим эпохам, 6-я и 9-я колонки содержат сведения о результатах вычисления объемов ледниковых тел, в 7-й и 10-й колонках показаны оценки средних мощностей ледовых тел, получаемых в результате деления объема на площадь поверхности. В 11-й колонке представлен список коэффициентов их деградации за период 1957–2020 годы. Для исчезнувших объектов данные отсутствуют.

Оценка суммарной площади оледенения, сформированной к 2020 году в горах Осетии и на участках Казбекско-Джигмарайского массива на территории Грузии, выполнена по космическим снимкам GOOGL и составила: $S_{ГО(2020)} = 136,17 \text{ км}^2$ по 104 контурам. Можно констатировать, что за рассматриваемый период времени – 63 года – исчезло 33 ледниковых образования. Расчет объемов каждого ледово-фирнового образования, для которого определена площадь дневной поверхности: $S_{i(2020)}$ по космическим снимкам 2020 года, была использована формула, аналогичная формуле (5):

$$V_{i(2020)} = V_{ГО(1957)} * S_{i(2020)}^{\frac{3}{2}} / \sum_{i=1}^{137} S_{i(1957)}^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

Суммарный объем льда по 104 оставшимся к 2020 году объектам составил: $V_{ГО(2020)} = 9,09 \text{ км}^3$. Расчет по формулам (5) и (6) выполнен в единых долях (изменяется только площадь поверхности объекта: S_i), что обеспечивает сопоставимость результатов по обеим эпохам. Сами результаты вычислений представлены в *таблице 1*.

В *таблице 2* собраны сведения по изменению основных параметров ледово-фирнового покрова, суммированных по признакам расположения в границах речных бассейнов, приуроченности к горному массиву и экспозиции. В две последние колонки выведены коэффициенты деградации площадей оледенения и объемов льда соответствующих комплексов.

Обращает на себя внимание факт меньшей скорости деградации оледенения на южных склонах Казбеко-Джигмарайского массива (Грузия), чем на северных. Оледенение Куртатинского, Алагирского и Гизельдонского ущелий сокращается более высокими темпами, чем Дигорского, Геналдонского и бассейна р. Терек. Разность скоростей достигает 20–25 %. Неравномерность отступления ледников на рассматриваемой территории наглядно представлена на *диаграмме 1*. Сортированные по убыванию величины площадей: $S_{i(1957)}$ всех ледово-фирновых объектов объединены графиком красного цвета. Для этой же последовательности показаны величины площадей: $S_{i(2020)}$. Столь значительный разброс темпов деградации по локальным участкам определяется многими факторами. Гипсометрия, экспозиция, микроклиматические особенности, приуроченность к различным высотным ярусам, наличие поверхностной морены и ее литологический состав – все эти факторы оказывают собственное влияние на состояние ледово-фирнового образования.

Таблица 2
Изменения основных параметров ледового покрова за период 1957-2020 гг.

№	Экспозиция	Группа	Ущелье	S1(км ²) 1957	V1(км ³) 1957	S2(км ²) 2020	V2(км ³) 2020	S2 / S1	V2 / V1
1		КД		67,4161	4,6811	45,8921	2,8280	0,6807	0,6041
2		КД Грузия		38,5537	2,6645	27,0974	1,6794	0,7028	0,6303
3		КД Осетия		28,8625	2,0166	18,7947	1,1486	0,6512	0,5696
4	СЕВ			189,635	13,3335	109,614	7,5165	0,5780	0,5637
5	ЮЖ			34,0496	2,3721	24,3380	1,5276	0,7148	0,6440
6	В-3			3,5836	0,0963	2,2220	0,0500	0,6200	0,5187
7			Дигорское	97,3022	7,8916	60,0700	4,7822	0,5450	0,6060
8			Алагирское	48,9251	2,7660	24,2243	1,2910	0,4951	0,4667
9			Куртатинское	10,1952	0,3785	4,6681	0,1739	0,4579	0,4594
10			Гизельдонское	16,7455	1,0809	9,9140	0,5648	0,5920	0,5225
11			Геналдонское	13,6679	0,9439	9,0286	0,5720	0,6606	0,6060
12			Терек (Грузия)	40,4326	2,7410	28,1191	1,7101	0,6955	0,6239
сумма				227,269	15,8019	136,174	9,0941	0,5992	0,5755

Примечание:

КД – Казбекско-Джигмарайский горный массив;
КД Грузия – Казбекско-Джигмарайский горный массив, склоны на территории Грузии;
КД Осетия – Казбекско-Джигмарайский горный массив, склоны на территории Осетии.



Номера ледников в соответствии с картой и таблицей 1

Диаграмма 1. Графики распределения ледников Осетинской части Центрального Кавказа и Ю-В склонов Казбеко-Джигмарайского массива на территории Грузии по величине занимаемой площади. На 1957 год – красный цвет, на 2020 год – синий цвет

Разнообразие их комбинаций и определяет наблюдаемую пространственно-временную неравномерность в процессе распада горного оледенения [14, 23, 24].

Изложенная методика не может служить инструментом изучения физико-динамических параметров как крупных центров оледенения, так и отдельных его частей – ледников. Однако она представляется удобным и простым средством контроля за изменениями объемов ледниковых тел, практически с той же ошибкой, которая была заложена в исходные данные при расчете суммарного объема оледенения на рассматриваемой территории. Ее простоту обеспечивает математически оправданная возможность представления реального ледникового тела любой конфигурации в виде правильного геометрического тела, биективно связанного со своим прототипом. Теоретически, в сумме, выполняемые гомеоморфные преобразования форм отдельных ледниковых тел, не искажая величины исходного суммарного объема оледенения, предоставляют возможность его распределения по многочисленным объектам различной масштабности. Статистически возникающие случайные ошибки по отдельным объектам в своей сумме будут погашены. Мониторинг изменяющихся со временем площадей ледниковых образований в

заданных пространственных границах приобретает важную функцию – дистанционный контроль за балансом объемов льда на любом участке. Предлагаемая зависимость объема ледово-фирнового i -образования от площади его дневной поверхности:

$$V_i = k * S_i^{\frac{3}{2}}, \quad (7)$$

где k – эмпирический коэффициент, определяемый опытным путем на одном или нескольких репрезентативных ледниках. В нашем случае: $k = 0,029684$ (см. формулу 4) может быть использована на практике при решении задач хозяйственной деятельности человека.

Результатом работы можно считать получение реальной оценки сокращения площади оледенения в горах Северной Осетии на 40 % за 63 года, то есть деградация оледенения к настоящему моменту происходит со скоростью 0,63 % в год. Теоретически, при условии сохранения темпов распада ледовых образований, что маловероятно, все ледники исчезнут через 95–100 лет. Этот сценарий может быть изменен периодичностью климатических колебаний планетарного масштаба, и тенденция к глобальному потеплению изменится [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М.И. Изменения климата // Л., Гидрометеиздат, 1974. 280 с.
2. Панов В.Д. Новые данные о современном оледенении Кавказа // География и природные ресурсы, № 1, Новосибирск, 1981, 5 с.
3. Журавлев А.Б. Определение объема льда горных ледников по данным радиозондирования с вертолета // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1982, 23 с.
4. Борисович Ю.Г., Близняков Н.М., Израилевич Я.А., Фоменко Т.Н. Введение в топологию, 2-е изд., доп.—М.: Наука. Физматлит, 1995, 416 с. С 66.
5. Сейнова И.Б., Золотарев Е.А., Ледники и сели Приэльбрусья // М. Научный мир, 2001, 204 с.
6. Роттаева О.В., Никитин С.А., Бажев А.Б. и др. Толщина льда на южном склоне Эльбруса // Материалы гляциол. исслед., 2002, вып. 93, с. 143–151.
7. Лаврентьев И.И., Михаленко В.Н., Кутузов С.С. Толщина льда и подледный рельеф Западного ледникового плато Эльбруса // Лед и снег, 2010, № 2 (110), с. 12–18.
8. Кутузов С.С. Изменение площади и объема ледников хр. Терской Ала-Тоо во второй половине XX в. // Лед и снег, 2012, № 1 (117), с. 5–14.
9. Золотарев Е.А., Харьковец Е.Г. Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода // Лед и снег, 2012, № 2 (118), с. 15–22.
10. Мачерет Ю.Я., Кутузов С.С., Мацковский В.В., Лав-

- рентьев И.И.** Об оценке объема льда горных ледников // *Лед и снег*, 2013, № 1 (121), с. 5–16.
- 11. Петраков Д.А., Лаврентьев И.И., Коваленко Н.В., Усубалиев Р.А.** Толщина льда, объем и современные изменения площади ледника Сары-Тор (массив Ак-Шыйрак, Внутренний Тянь-Шань) // *Криосфера Земли*, 2014, т. XVIII, № 3, с. 91–100.
- 12. Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Петраков Д.А., Попов Г.А., Поповнин В.В.** Толщина, объем льда и подледный рельеф ледника Джанкуат // *Лед и снег*, 2014, № 4 (128), с. 7–19.
- 13. Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Василенко Е.В., Мачерет Ю.Я., Петраков Д.А., Попов Г.В.** Оценка объема ледников Большого Кавказа по данным радиозондирования и моделирования // *Криосфера Земли*, 2015, т. XIX, № 1, с. 78–88
- 14. Тиелидзе Л.Г., Носенко Г.А., Хромова Т.Е. и Фрэнк Пол.** Сильное ускорение потери площади ледников на Большом Кавказе за последние два десятилетия // *препринт*, октябрь, 2021.
- 15. Chen J., Ohmura A.** Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s // *IAHS Publ.*, 1990, No. 193, p. 125–135.
- 16. Haeberli W., Hoelzle M.** Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: A pilot study with the European Alps // *Ann. Glaciol.*, 1995, vol. 21, p. 206–212.
- 17. Abermann J., Lambrecht A., Fischer A., Kuhn M.** Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969–1997–2006) // *The Cryosphere*, 2009, No. 3, p. 205–215, doi:10.5194/tc-3-205-2009.
- 18. Farinotti D., Huss M., Bauder A., Funk M.** A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers // *J. Glaciol.*, 2009, vol. 55, No. 191, p. 422–430.
- 19. Gabbi J., Farinotti D., Bauder A., Maurer H.** Ice volume distribution and implications on runoff projections in a glacierized catchment // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2012, No. 16, p. 4543–4556, doi:10.5194/hess-16-4543-2012.
- 20. Huss M., Farinotti D.** Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe // *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, iss. F4, p.1–10, doi:10.1029/2012JF002523.
- 21. Farinotti D., Huss M.** An upper-bound estimate for the accuracy of glacier volume – area scaling // *The Cryosphere*, 2013, No. 7, p. 1707–1720, doi:10.5194/tc-7-1707-2013
- 22. Grinsted A.** An estimate of global glacier volume // *The Cryosphere*, 2013, No. 7, p. 141–151.
- 23. Levan G. Tielidze, Nino Chikhradze, David Svanadze,** Glaciers Amount and Extent Change in the Dolra River Basin in 1911-1960-2014 Years, Caucasus Mountains, Georgia, Observed with Old Topographical Maps and Landsat Satellite Imagery // *American Journal of Climate Change*, 2015, 4, 217–225, <http://dx.doi.org/10.4236/aicc.2015.43017>
- 24. Levan G. Tielidze, Gennady A. Nosenko, Tatiana E. Khromova, Frank Paul,** Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus over the past two decades // *Preprint*. Discussion started: 8 October 2021 © Author(s) 2021. CC BY 4.0 License.

REFERENCES

1. Budyko M.I. *Izmeneniya klimata* // *L., Gidrometeoizdat*, 1974. 280 s.
2. Panov V.D. *Novye dannye o sovremennom oledenenii Kavkaza* // *Geografiya i prirodnye resursy*, № 1, Novosibirsk, 1981, 5 s.
3. Zhuravlev A.V., Nikitin A.A. *Vvedenie v topologiyu, 2-e izd., dop.—M.: Nauka. Fizmatlit*, 1995, 416 s. S 66.
4. Borisovich YU.G., Bliznyakov N.M., Izrailevich YA.A., Fomenko T.N. *Vvedenie v topologiyu, 2-e izd., dop.—M.: Nauka. Fizmatlit*, 1995, 416 s. S 66.
5. Sejnova I.B., Zolotaryov E.A., *Ledniki i seli Priel'brus'ya* // *M. Nauchnyj mir*, 2001, 204 s.
6. Rotavaeva O.V., Nikitin S.A., Bazhev A.B. i dr. *Tolshchina l'da na yuzhnom sklone El'brusa* // *Materialy glyciol. issled.*, 2002, vyp. 93, s. 143–151.
7. Lavrent'ev I.I., Mihalenko V.N., Kutuzov S.S. *Tolshchina l'da i podlednyj rel'ef Zapadnogo lednikovogo plato El'brusa* // *Led i sneg*, 2010, № 2 (110), s. 12–18.
8. Kutuzov S.S. *Izmenenie ploschadi i ob'ema lednikov hr. Terskej Ala-Too vo vtoroj polovine XX v.* // *Led i sneg*, 2012, № 1 (117), s. 5–14.
9. Zolotarev E.A., Har'kovec E.G. *Evoluciya oledneniya El'brusa posle malogo lednikovogo perioda* // *Led i sneg*, 2012, № 2 (118), s. 15–22.
10. Macheret YU.YA., Kutuzov S.S., Mackovskij V.V., Lavrent'ev I.I. *Ob ocenke ob'ema l'da gornyh lednikov* // *Led i sneg*, 2013, № 1 (121), s. 5–16.
11. Petrakov D.A., Lavrent'ev I.I., Kovalenko N.V., Usubaliev R.A. *Tolshchina l'da, ob'em i sovremennye izmeneniya ploschadi lednika Sary-Tor (massiv Ak-SHyjrak, Vnutrennij Tyan'-SHan')* // *Kriosfera Zemli*, 2014, t. XVIII, № 3, с. 91–100.
12. Lavrent'ev I.I., Kutuzov S.S., Petrakov D.A., Popov G.A., Popovnin V.V. *Tolshchina, ob'em l'da i podlednyj rel'ef lednika Dzhankuat* // *Led i sneg*, 2014, № 4 (128), с. 7–19.
13. Kutuzov S.S., Lavrent'ev I.I., Vasilenko E.V., Macheret YU.YA., Petrakov D.A., Popov G.V. *Ocenka ob'ema lednikov Bol'shogo Kavkaza po dannym radiozondirovaniya i modelirovaniya* // *Kriosfera Zemli*, 2015, t. XIX, № 1, с. 78–88
14. Tielidze L.G., Nosenko G.A., Hromova T.E. i Frenk Pol. *Sil'noe uskorenie poteri ploschadi lednikov na Bol'shom Kavkaze za poslednie dva desyatletiya* // *preprint, oktyabr'*, 2021.
15. Chen J., Ohmura A. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s // *IAHS Publ.*, 1990, No. 193, p. 125–135.
16. Haeberli W., Hoelzle M. Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: A pilot study with the European Alps // *Ann. Glaciol.*, 1995, vol. 21, p. 206–212.
17. Abermann J., Lambrecht A., Fischer A., Kuhn M. Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969–1997–2006) // *The Cryosphere*, 2009, No. 3, p. 205–215, doi:10.5194/tc-3-205-2009.
18. Farinotti D., Huss M., Bauder A., Funk M. A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers // *J. Glaciol.*, 2009, vol. 55, No. 191, p. 422–430.
19. Gabbi J., Farinotti D., Bauder A., Maurer H. Ice volume distribution and implications on runoff projections in a glacierized catchment // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2012, No. 16, r. 4543–4556, doi:10.5194/hess-16-4543-2012.
20. Huss M., Farinotti D. Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe // *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117, iss. F4, p.1–10, doi:10.1029/2012JF002523.
21. Farinotti D., Huss M. An upper-bound estimate for the accuracy of glacier volume – area scaling // *The Cryosphere*, 2013, No. 7, p. 1707–1720, doi:10.5194/tc-7-1707-2013
22. Grinsted A. An estimate of global glacier volume // *The Cryosphere*, 2013, No. 7, p. 141–151.
23. Levan G. Tielidze, Nino Chikhradze, David Svanadze, Glaciers Amount and Extent Change in the Dolra River Basin in 1911-1960-2014 Years, Caucasus Mountains, Georgia, Observed with Old Topographical Maps and Landsat Satellite Imagery // *American Journal of Climate Change*, 2015, 4, 217–225, <http://dx.doi.org/10.4236/aicc.2015.43017>
24. Levan G. Tielidze, Gennady A. Nosenko, Tatiana E. Khromova, Frank Paul, Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus over the past two decades // *Preprint*. Discussion started: 8 October 2021 © Author(s) 2021. CC BY 4.0 License.