

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 551.332.56

DOI: 10.15372/KZ20230105

ДИНАМИКА ОЗЕР ЛЕДНИКА БОЛЬШОЙ АЗАУ НА ЭЛЬБРУСЕ

А.Х. Аджиев¹, М.Ю. Беккиев¹, М.Д. Докукин¹, Р.Х. Калов¹, Е.А. Савернюк², С.И. Шагин³¹Высокогорный геофизический институт, 360030, Нальчик, пр. Ленина, 2, Россия; inrush@bk.ru²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; savernyuk@gmail.com³Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, управление научных исследований и инновационной деятельности, 360004, Нальчик, ул. Толстого, 175а, Россия; uniid-sergey@yandex.ru

В связи с высокими темпами деградации ледника Большой Азау на Эльбрусе возникла необходимость оценки развития озер на территории, освободившейся ото льда, и на самом леднике. С этой целью проведен анализ разновременной аэрокосмической информации за период 1957–2021 гг., материалов аэровизуальных обследований, сведений из интернет-источников, сообщений и фотографий туристов. Установлено существование в разное время 15 озер площадью 0.14–20.25 тыс. м² на леднике Большой Азау и прилегающей территории. Выявлено длительное существование озера на контакте с ледником на перевале Эхо Войны с площадью до 4.5 тыс. м² в период с 1971 по 2009 г. Максимальная площадь (20.25 тыс. м²) была определена по космоснимку 25.06.2009 г. у озера, расположенного на участке мертвых льдов срединных морен между левым и правым основными потоками льда ледника Большой Азау. В мульдах на поверхности ледника в разное время существовало три озера с максимальной площадью 7.86 тыс. м². Озера на леднике Большой Азау появляются в основном в период таяния снежного покрова, когда в мульдах на участке оттока воды сохраняются в виде плотин массы метелевого снега. Исчезновение озер происходит в результате таяния снежных плотин, а также по подледным и подземным каналам стока.

Ключевые слова: ледник, космоснимки, ледниковое озеро, канал стока, снежный покров, котловина озера.

DYNAMICS OF LAKES OF THE BOLSHOY AZAU GLACIER ON ELBRUS

A.H. Adzhiev¹, M.Yu. Bekkiev¹, M.D. Dokukin¹, R.Kh. Kalov¹, E.A. Savernyuk², S.I. Shagin³¹High Mountain Geophysical Institute, Lenina ave. 2, Nalchik, 360030, Russia; inrush@bk.ru²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia³Kabardino-Balkarian State University, Department of Scientific Research and Innovation, Tolstoy str. 175a, Nalchik, 360004, Russia

High rates of degradation of the Bolshoy Azau Glacier on Elbrus make it necessary to assess the development of lakes on the ice-free land and on the glacier itself. For this purpose, aerospace data for the period of 1957–2021, as well as information from visual observations, Internet sources, and tourist photographs were analyzed. The existence of 15 lakes with an area of 0.14–20.25 thousand m² on the Bolshoy Azau Glacier and the adjacent territory was recorded at various times. The long-term existence of the lake in contact with the glacier on the Echo of the War mountain passage covering with an area of up to 4.5 thousand m² was revealed for the period of 1971–2009. The maximum area (20.25 thousand m²) was detected on a satellite image from June 25, 2009 for a lake on the dead ice part of the median moraine between left and right ice streams of the Bolshoy Azau Glacier. In the hollows on the glacier surface, up to three lakes with a maximum total area of 7.86 thousand m² were observed in different times. Lakes on the Bolshoy Azau Glacier appeared mainly during the snow cover melting, while masses of drifted snow served as dams in the drainage area of hollows. These lakes disappeared after melting of drifted snow dams and/or in the course of drainage through subglacial and underground runoff channels.

Keywords: glacier, satellite images, glacial lake, drainage channel, snow cover, lake basin.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с потеплением климата и деградацией ледников образуются новые озера, которые могут представлять опасность в плане прорывов и паводков. Прорывы озер приводили к катастрофам с

большим количеством жертв – до 4000–6000 человек [Allen et al., 2016; Mergili et al., 2020]. По данным А. Эммера [Emmer, 2018], в базе данных Web of Science в период 1979–2016 гг. зафиксировано

892 статьи по тематике прорывов озер. На Кавказе катастрофическим был прорыв озера Башкара в 2017 г. [Черноморец и др., 2018]. Неоднократно происходили прорывы озер, образовавшихся перед ледниками Эльбруса: в 1909, 1973, 1983, 1993, 1999, 2003, 2006 гг. в верховьях р. Бирджалысу [Герасимов, 1909; Черноморец и др., 2007; Докукин и др., 2012, 2022], в бассейне Азау в 1895 г. [Иванов, 1902], в 1912 и 1947 г. в верховьях р. Гарабаша, в

1978 и 2011 гг. в верховьях р. Малая Азау [Сейнова, Золотарев, 2001; Докукин и др., 2016].

Темпы деградации ледников Эльбруса в XXI в. значительно возросли [Беккиев и др., 2021; Kutuzov et al., 2019]. В работе [Васильчук и др., 2010] отмечались риски возникновения и прорыва озер перед ледником Большой Азау. Для того чтобы оценить масштабы и темпы формирования и эволюцию озер на территории, освободившейся

Таблица 1. **Использованные материалы**

Материалы	Год/дата	Масштаб, разрешение, м (МС/Панхр.)*	Источник, правообладатель
Аэрофотоснимки	22.08.1957, 08.09.1973, 1975, 17.08.1983, 27.07.1988	1:25 000	Архив ФГБУ “Высокогорный геофизический институт”
Топографические карты	1958	1:10 000	Атлас ледников Эльбруса [Атлас..., 1965]
	2012	1:5000	ООО “Аэротех”
Ортофотопланы	1997	1:10 000	И.А. Лабутина, Е.А. Золотарев и др.
	28.09.2012	1:5000	ООО “Аэротех”
Космические снимки:			
КН-4В (Corona)	20.09.1971	1.8	Сайт EartExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/)
Landsat 7	09.08.1999, 12.09.2000	30/15	
IRS P5**	12.09.2007	2.5	© 2003-2007 ANTRIX
IRS 1C/1D**	01.08.2006, 11.08.2006	23/5.8	© 2006 National Remote Sensing Centre, Department of Space, Government of India
EROS A**	20.07.2007	1.8	© 2007 ImageSat International N.V.
SPOT 5**	21.09.2011	10/2.5	© CNES 2011
GeoEye-1**	19.09.2009, 16.10.2009, 23.09.2014	1.64/0.41	© GeoEye, Inc.
GeoEye-1	15.02.2014, 12.09.2015	1.64/0.41	World Imagery (http://goto.arcgisonline.com/maps/World_Imagery)
WorldView2	31.08.2010	1.84/0.46	
Pleiades-1A**	06.09.2014	2/0.5	© CNES 2014
Pleiades-1B**	23.08.2015		© CNES 2015
Sentinel-2	2015–2021	20/10	Сайт Sentinel Hub EO Browser (https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/)
Landsat-5	2009	82/30	
Landsat-8	2013–2015	30/15	
Ресурс П	19.08.2016	3/1	Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии “ПЛАНЕТА”
Канопус В5	15.09.2020	10.5/2.1	
Наземные фотографии	29.08.1973	–	В.Ф. Сухомейло
	июль 1985	–	uz89 (https://risk.ru/blog/198343)
	27.08.2008	–	А. Лебедев
	07.06.2020	–	К. Лагодниенко
	2009–2012	–	Я. Бережко
Фотографии с вертолета	18.06.2009, 17.06.2011, 23.06.2015	–	М.Д. Докукин

* МС – мультиспектральный диапазон, Панхр. – панхроматический диапазон.

** Космические снимки IRS, EROS, SPOT, GeoEye, Pleiades любезно предоставлены Инженерно-технологическим центром “СканЭкс”.

Примечание. Тире – снимки сделаны различными моделями цифровых и зеркальных камер.

ото льда ледника Большой Азау, а также на самом леднике, был проведен анализ разновременной информации.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были использованы аэрофотоснимки, космические снимки, топографические карты и ортофотопланы, фотографии с вертолетных облетов и наземные фотографии разных авторов (табл. 1).

Космические снимки и аэрофотоснимки трансформировались (привязывались по опорным точкам с применением трансформации Spline) и приводились к системе координат WGS 84 в проекции UTM зона 38N в программе ArcMap 10.7, в которой отрисовывались электронные слои контуров озер и определялись их площади. Ошибки измерений площадей озер определены в результате трехкратного отрисовывания контуров озер. На космоснимках Sentinel-2 и Landsat 5-8 озера более четко отображались с использованием ложного цвета (false color, каналы 8, 4, 3). В зависимости от характеристик космоснимков, четкости береговых линий и формы озер ошибки измерений площади составили 1–33 % (в основном до 10 %). Абсолютные высоты озер определялись по топографической карте 2012 г. масштаба 1:5000.

С целью выявления изменений в состоянии озер и их котловин, определения участков мерт-

вых льдов и границ ледника проводилось сравнительное дешифрирование разновременных снимков с применением инструмента “Зашторить слой” (Swipe Layer) для интерактивного отображения разновременных слоев в программе ArcMap, а также в режиме GIF-анимации в программе Easy GIF Animator Pro.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По данным [Беккиев и др., 2021], площадь ледника Большой Азау с 1957 по 2020 г. уменьшилась на 6.35 км² с учетом сокращения языка ледника, спускавшегося в долину р. Уллукам. За период 2011–2021 гг. уменьшение площади ледника Большой Азау, включая участки на границе ледников Большой и Малый Азау, составило 2.21 км² (почти 35 % от общей убыли площади за 1957–

Таблица 2. Характеристики озер ледника Большой Азау

Номер	Координаты	Высота над ур. моря, м	Макс. площадь, тыс. м ²	Дата
<i>Восточные озера</i>				
1	43°17'07,89" с.ш., 42°26'22,54" в.д.	3251	0.14 ± 0.012	19.09.2009
2	43°17'05,07" с.ш., 42°26'22,97" в.д.	3247	0.59 ± 0.03	31.08.2010
3	43°17'04,02" с.ш., 42°26'21,71" в.д.	3244	0.67 ± 0.007	23.06.2015
4	43°17'10,81" с.ш., 42°26'20,80" в.д.	3262	0.41 ± 0.010	15.09.2020
<i>Северные озера</i>				
5	43°18'20,46" с.ш., 42°25'11,30" в.д.	3637	1.12 ± 0.07	12.09.2015
6	43°18'19,64" с.ш., 42°25'02,18" в.д.	3637	2.43 ± 0.024	28.09.2012
7	43°18'20,97" с.ш., 42°24'57,12" в.д.	3638	3.86 ± 0.10 0.43 ± 0.041	12.09.2015
8	43°18'28,09" с.ш., 42°24'10,25" в.д.	3600	2.20 ± 0.18	27.08.2021
<i>Озера ледникового цирка Хотютау и массива срединных морен</i>				
9	43°17'43,11" с.ш., 42°24'25,79" в.д.	3385	2.56 ± 0.55	07.06.2017
10	43°17'21,30" с.ш., 42°24'30,05" в.д.	3349	3.50 ± 0.15	20.07.2007
11	43°17'20,31" с.ш., 42°24'50,83" в.д.	3260	7.96 ± 0.97	19.06.2016
12	43°17'18,51" с.ш., 42°25'16,60" в.д.	3250–3255	20.25 ± 1.03	25.06.2009
13	43°17'13,99" с.ш., 42°25'14,97" в.д.	3255–3260	6.28 ± 1.02	02.06.2019
14	43°17'13,55" с.ш., 42°25'31,03" в.д.	3255	14.92 ± 5.01	19.06.2016
<i>Озеро на перевале Эхо Войны</i>				
15	43°16'40,32" с.ш., 42°25'41,90" в.д.	3315	4.54 ± 0.07	20.07.2007

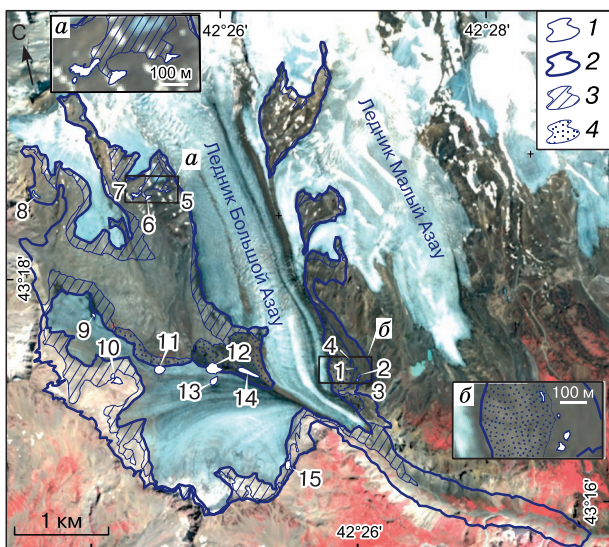


Рис. 1. Деградация ледника Большой Азау за 1957–2021 гг. и образовавшиеся озера:

а – укрупненный фрагмент участка северных озер, б – укрупненный фрагмент участка восточных озер. Номера озер см. в табл. 2. 1 – озера; 2 – участки, освободившиеся ото льда за 1957–2021 гг.; 3 – участки, освободившиеся ото льда за 2011–2021 гг.; 4 – мертвые льды. В подложке космоснимок Sentinel-2 от 27.08.2021 г.

2021 гг.). К западному и центральному участкам максимальной дегляциации добавлена площадь образовавшегося массива мертвого льда из срединных морен, выявленная по факту отсутствия движения льда при анализе динамики в ArcMap и анализе GIF-анимаций.

На рис. 1 показаны участки дегляциации и озера, существовавшие в разное время на этих участках и на самом леднике Большой Азау. Всего выявлено 15 озер: 4 озера на восточном участке, 4 озера на северном участке, 6 озер в цирке Хотютау и на участке срединных морен и 1 озеро на перевале Эхо Войны. Характеристики озер представлены в табл. 2.

Восточные озера (№ 1–4)

Озера появились после отступления левого края ледника в XXI в. на участках понижений ко-

ренного рельефа, покрытых мореной. Сообщение о существовании озер и их фотографии 2008 г. получены от А. Лебедева. Вследствие малого размера их динамика изучена в основном по космоснимкам сверхвысокого разрешения (рис. 2).

Особенностью динамики восточных озер является исчезновение озера № 2 во второй половине сентября (см. рис. 2, б (19.09.2009), рис. 2, з (23.09.2014)) при его наличии в августе и начале сентября (см. рис. 2, в (31.08.2010), рис. 2, д (23.08.2015)). Это, возможно, связано с тем, что основной водный поток с ледника проходит в стороне от озера № 2, а попадает в котловину при ответвлении русла в период максимальных уровней воды в июле–августе. Тогда площадь озера достигала 0,6 тыс. м². В конце августа–начале сентября на космоснимках у озера существовала светлая кайма, свидетельствующая о снижении уровня

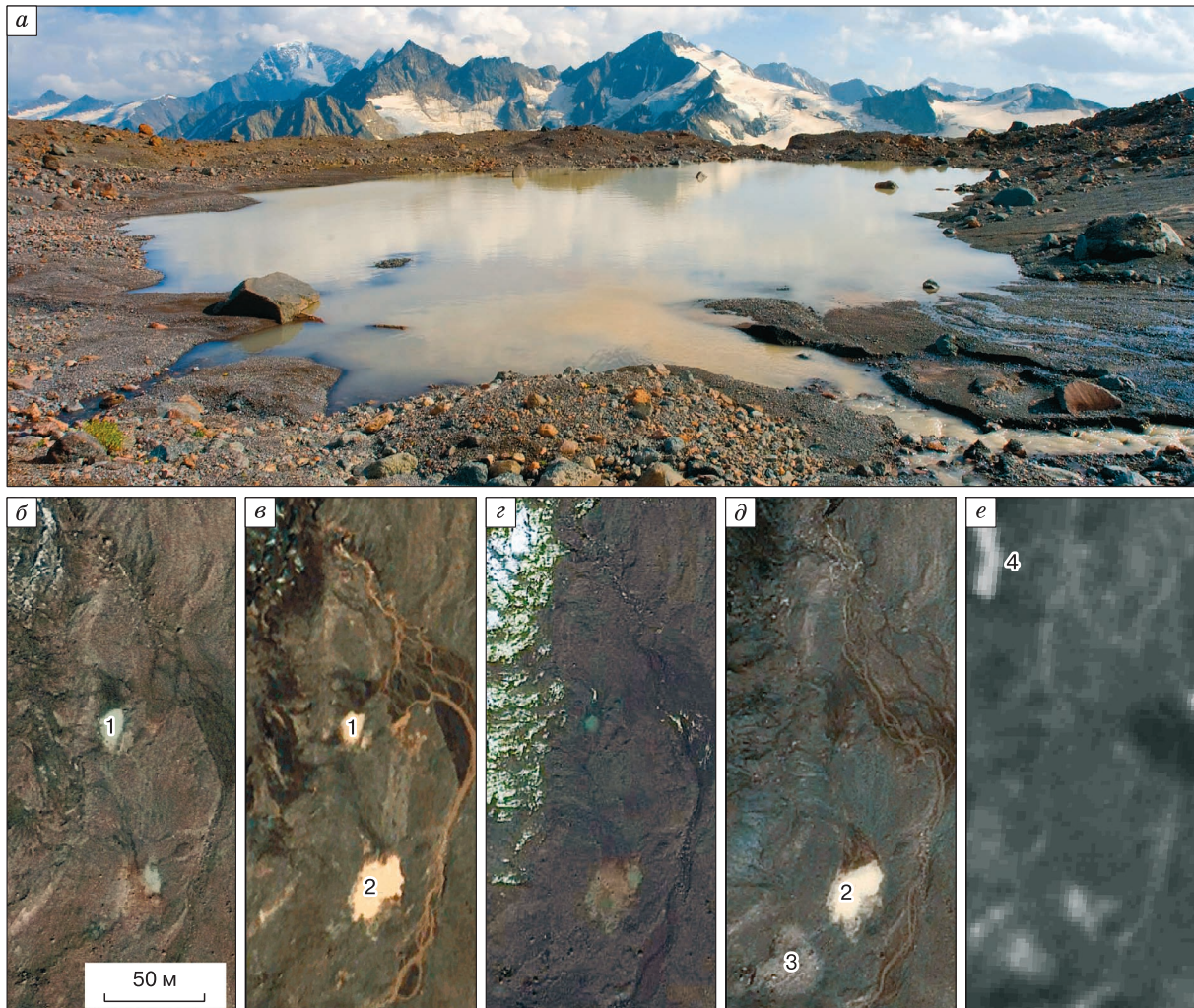


Рис. 2. Озера к востоку от ледника Большой Азау:

а – озеро № 2 на фотографии А. Лебедева (27.08.2008); космоснимки: б – GeoEye-1 (19.09.2009), в – WorldView2 (31.08.2010), г – GeoEye-1 (23.09.2014), д – Pleiades (23.08.2015), е – Канопус В5 (15.09.2020). Номера озер см. на рис. 1 и в табл. 2.

воды. Озеро № 2 существовало в 2016–2019 гг. и отсутствовало в 2020–2021 гг. В 2014–2015 гг. вода перестала поступать в котловину озера № 1, которая к тому времени уже была почти занесена флювиогляциальными отложениями.

Существование озера № 3 обнаружено по косвенному признаку – появление светлого контура в 2015 г. в том месте, где его не было в предыдущие годы (см. рис. 2, д). Факт существования озера № 3 подтвержден данными вертолетного облета 23.06.2015 г. – на обозначенном контуре был водоем с многочисленными льдинами в углублении на заснеженной поверхности. В последующие годы озеро № 3 (по данным космоснимков Sentinel-2) существовало в период таяния снежного покрова в июне–начале июля. Озеро № 4 появилось на участке мертвых льдов в 2020 г. и существовало в 2021 г. (см. рис. 2, е).

Северные озера (№ 5–8)

Динамика северных озер показана на рис. 3, их площади приведены в табл. 2. Формирование озер началось с 2007 г. после отступления ледника с территории лавового потока с несколькими локальными понижениями на нем. К 2012 г. ледник и мертвый лед еще частично заполняли котловины озер № 5 и 7 (см. рис. 3, а). Озеро № 6 уже имело максимальную площадь. В 2015 г. озера № 5 и 7 достигли максимальных размеров (см. рис. 3, в), а озеро № 6 исчезло после того, как водный поток с ледника перестал попадать в его котловину из-за особенностей рельефа. При этом на февральском космоснимке 2014 г. (см. рис. 3, б) видно, что зимой все озера отсутствуют, что объясняется наличием подземного стока из озер, как отмечено в работе [Докукин, Шагин, 2014].

Площадь озера № 5 летом была практически неизменной до 2021 г., а озеро № 7 испытывало колебания уровня: в 2019–2020 гг. в августе площадь уменьшалась с 3,9 до 1,1–1,2 тыс. м². Это можно объяснить тем, что основной сток с ледника уже не попадает в котловину и озеро питается двумя остаточными ледничками, сток с которых в конце лета становится меньше, чем отток воды из озер по подземным каналам. В конце августа 2021 г. на участке озер еще оставались снежники, таяние которых сохраняло приток воды в озеро № 7 на высоком уровне. Площадь озера стала постепенно сокращаться после 4 сентября в результате похолодания и резко уменьшилась только в конце сентября 2021 г. Такое же быстрое сокращение площади наблюдалось во второй половине августа 2020 г. у озера № 8, которое образовалось в 1980-х гг.

Озера (№ 9–14) в цирке Хотютау и на массиве срединных морен

Существование озера № 9 выявлено по фотографии неизвестного автора, датированной 1991 г.

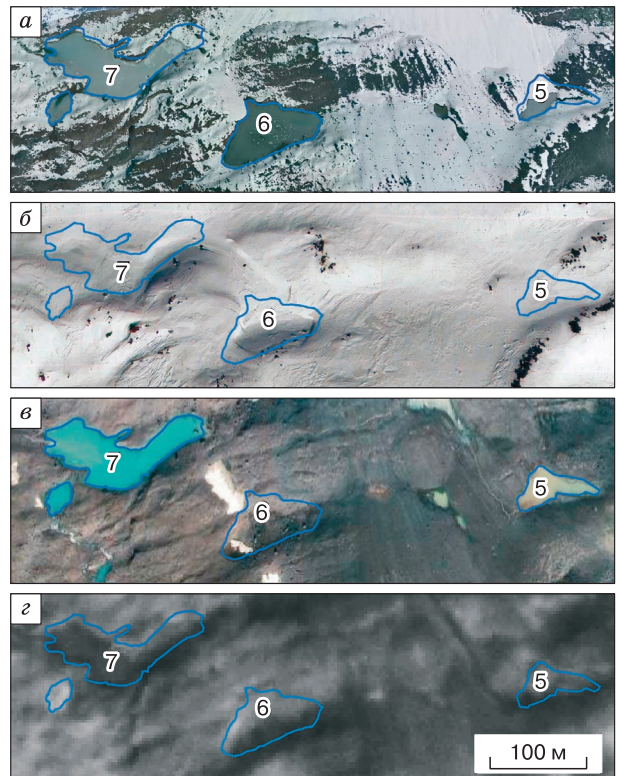


Рис. 3. Северная группа озер:

а – аэрофотоснимок ООО “Аэротех” (28.09.2012); б – космоснимок GeoEye-1 (15.02.2014); в – космоснимок GeoEye-1 (12.09.2015); з – космоснимок Канопус В5 (15.09.2020). Границы озер № 5 и 7 нанесены по данным 2015 г., озера № 6 – по данным 2012 г.

Озеро зафиксировано на поверхности ледника Большой Азау во время облета 17.06.2011 г. и на космоснимках в последующие годы в начале лета. Ниже котловины существует постоянное русло, выработанное водным потоком на поверхности ледника.

Озеро № 10 появилось на поверхности выступа коренных пород (ригеля) с моренным чехлом после отступления с него ледника на более низкие отметки. Динамика озера изучена по снимкам высокого и сверхвысокого разрешения (рис. 4).

Сравнение космоснимков с топокартой масштаба 1:5000 показало, что уровень воды в озере с 2007 по 2012 г. понизился на 5 м, а в 2007 г. максимальная глубина озера была 3,5 м. Ледник был плотиной озера с северо-западной стороны. В 2007 г. наблюдался поверхностный сток с озера в юго-восточном направлении. По мере отступления ледника озеро продолжало существовать, но поверхностный сток из него прекратился. Сравнение вертолетного снимка 17.06.2011 г. (см. рис. 4, з) и космоснимка 21.09.2011 г. показало, что резкое уменьшение площади с 3,21 до 1,75 тыс. м² произошло в 2011 г., когда на поверхности ледни-

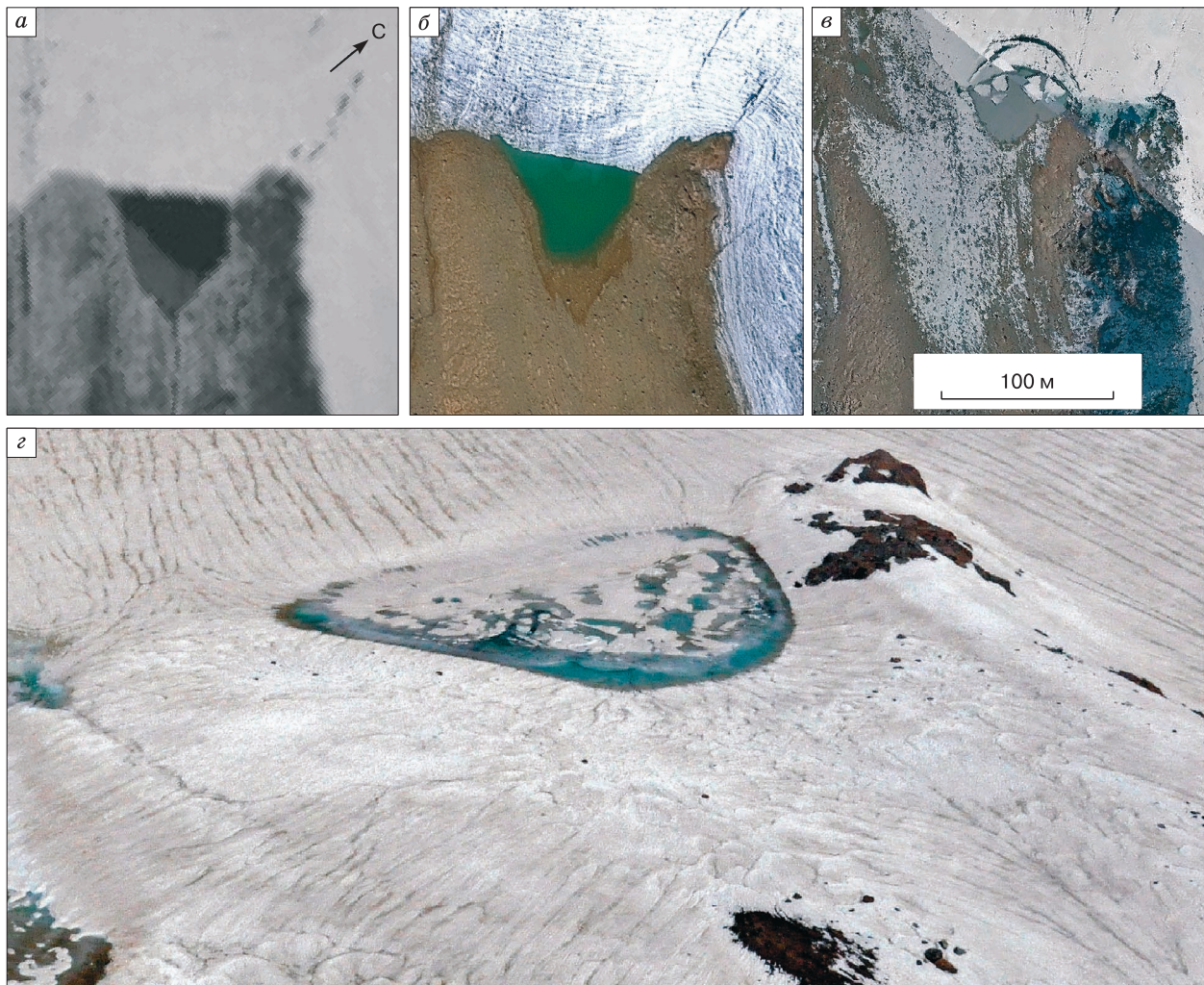


Рис. 4. Озеро № 10 на ригеле в цирке Хотютау:

a – космоснимок EROS A (20.07.2007); *б* – космоснимок GeoEye-1 (19.09.2009); *в* – аэрофотоснимок ООО “Аэротех” (28.09.2012); *г* – фотография М.Д. Докукина (17.06.2011).

ка появились дугообразные трещины и уровень воды в озере понизился на 4 м.

Подобные трещины свидетельствуют о том, что под поверхностью ледника в то время существовал грот, заполненный водами озера, свод которого затем обрушился. В дальнейшем оставшееся небольшое озеро существовало до 2015 г. (площадь 1 тыс. м², 12.09.2015) и затем исчезло.

Озеро № 11 зафиксировано на космоснимке 20.07.2007 г. (рис. 5, *a*), его следы были выявлены на вертолетном снимке 17.06.2011 г. (см. рис. 5, *г*).

На космоснимках 2013–2015 гг. озеро не выявлено. В 2016 г. озеро появилось 30 мая и достигло максимальной площади (около 8 тыс. м²) 19–22 июня (см. рис. 5, *б*). Затем озеро значительно уменьшилось и исчезло к началу июля. В 2017 и 2018 гг. оно существовало непродолжительное время, его площадь была менее 100–200 м².

В 2019 г. озеро существовало в мае площадью до 2 тыс. м², а в июне было минимальным (см. рис. 5, *в*). В 2020 и 2021 гг. озеро отсутствовало.

Озеро № 12 образовалось в термокарстовой воронке на участке мертвых льдов массива срединных морен (рис. 6).

На космоснимке 20.07.2007 г. (см. рис. 6, *в*) зафиксированы следы существования озера № 12 в виде овальной линии на заснеженной поверхности ледника. Озеро выявлено при облете 18.06.2009 г. (см. рис. 6, *a*). Его площадь превышала 12 тыс. м². Максимальные размеры озера выявлены 25 июня 2009 г. на космоснимке Landsat-5 – около 20 тыс. м² (см. рис. 6, *г*). На фотографии 17.06.2011 г. и на космоснимке 21.09.2011 г. озера уже не было (см. рис. 6, *б*, *д*).

При сравнении космоснимков 11.08.2006 г. (разрешением 5.8 м) и 19.09.2009 г. на первом

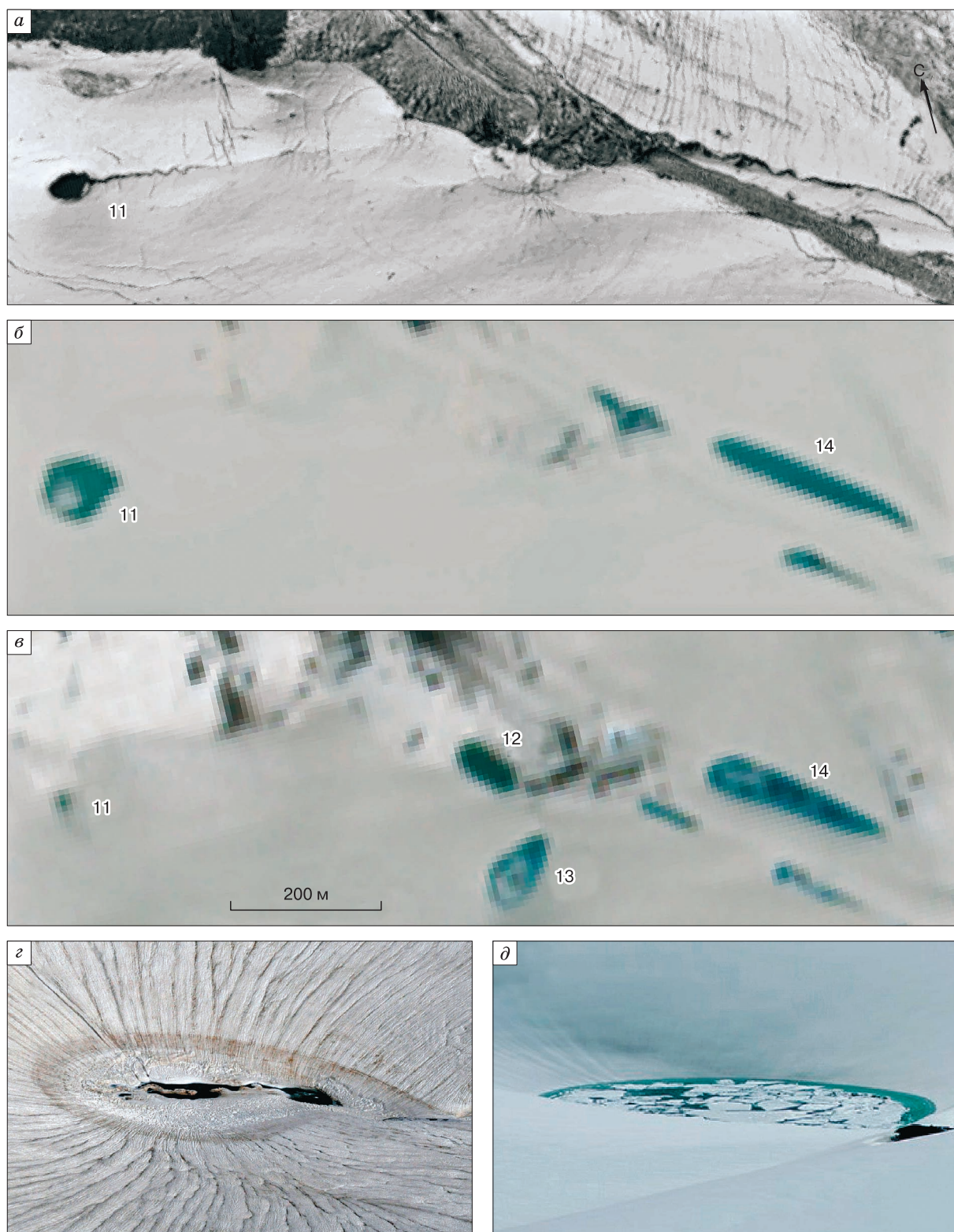


Рис. 5. Озера на леднике Большой Азау и на массиве мертвых льдов срединных морен:

a – космоснимок EROS A (20.07.2007); *б* – космоснимок Sentinel-2 (19.06.2016); *в* – космоснимок Sentinel-2 (02.06.2019); *з* – следы озера № 11, фотография М.Д. Докукина (17.06.2011); *д* – озеро № 13, фотография К. Лагодиевко (07.06.2020).

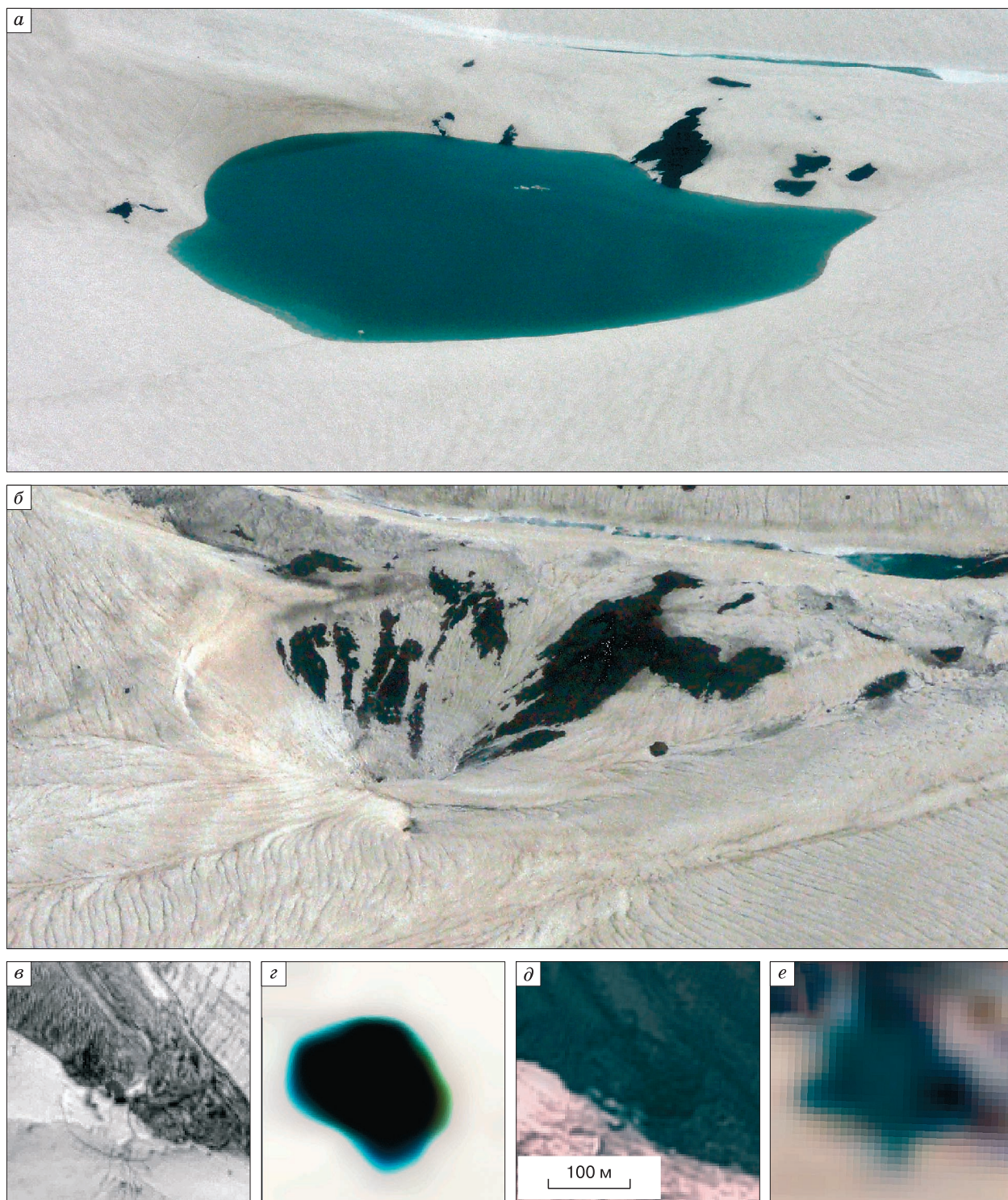


Рис. 6. Озеро № 12 на массиве мертвых льдов срединных морен:

a – фотография М.Д. Докукина (18.06.2009); *б* – фотография М.Д. Докукина (17.06.2011); *в* – космоснимок EROS A (20.07.2007); *г* – космоснимок Landsat-5 (25.06.2009); *д* – космоснимок SPOT 5 (21.09.2011); *е* – космоснимок Landsat-8 (13.06.2013).

снимке выявлены схожие черты термокарстовой воронки со свежими краями и стенками, что позволяет предполагать, что озеро № 12 существовало и в 2006 г. На вертолетном снимке 17.06.2011 г. (см. рис. 6, б) на заснеженных участках стенок воронки видна четкая граница, позволяющая предполагать, что это свежий след существования озера. Озеро выявлено на космоснимке 28.05.2013 г. и 13 июня оно имело площадь более 12 тыс. м² (см. рис. 6, е). На основе топокарты 2012 г. и контура озера был определен объем озера, существовавшего в 2013 г. – около 52 тыс. м³, глубина до 15–17 м. В конце июня 2013 г. озеро исчезло. Оно появилось в июне 2017 г. и просуществовало весь июнь (27 июня имело площадь 8,4 тыс. м²). Небольшое озеро (менее 4 тыс. м²) было 02.06.2019 г. В последующие годы озеро № 12 отсутствовало.

Мульда на леднике на месте озера № 13 начала формироваться в 2017 г. Первое озеро площадью менее 1 тыс. м² появилось в июне 2018 г. В 2019 г. озеро с такой же площадью появилось 13 мая и стало увеличиваться. К концу мая площадь озера, покрытого льдинами, достигла 6,3 тыс. м² (см. рис. 5, в). Размеры озера оставались стабильными весь июнь. Затем с освобождением ледника от снега площадь озера сократилась до 2,0–2,2 тыс. м². Озеро просуществовало на поверхности ледника до середины сентября. В 2020 г. озеро существовало с конца мая до 25 июля, практически не меняясь в размерах – около 3,3 тыс. м². В 2021 г., несмотря на увеличение мульды, площадь озера с конца мая до конца июня не превышала 2 тыс. м² (см. рис. 5, д).

Озеро № 14 длиной около 200 м установлено по космоснимку 31.05.2014 г. В 2015 г. озеро было почти не выражено. В 2016 г. озеро существовало в июне, достигнув 19 июня площади 14,92 тыс. м², длины 300 м и ширины 50 м (см. рис. 5, б). В конце июня озеро исчезло. В 2017 г. озеро появилось 8 мая и имело длину 150 м. В конце мая–начале июня 2017 г. озеро достигло обычных размеров (длина 240 м) и исчезло в начале июля. В 2018 г. 3 мая озеро имело длину 180 м, к 18 мая его длина достигла 260 м, просуществовало озеро до 14 июня. В 2019 г. озеро появилось в середине мая и к началу июня достигло длины 250 м (см. рис. 5, в). В июле озеро было относительно небольшим и исчезло в конце месяца. В 2020 г. майские снимки были в облаках. В июне 2020 г. длина озера достигала 150 м, а 8 июля – 180 м; 11 июля озера уже не было. В 2021 г. в мае–июне космоснимки были с облачностью, в конце июня озеро достигало длины 200 м, 8 июля озера уже не было.

Озеро (№ 15) на перевале Эхо Войны

Озеро существовало в сентябре 1971 г. (космоснимок КН-4В (Согопа) 20.09.1971 г., площадь 0,55 тыс. м²). В 1973 г. оно зафиксировано на фото-

тографии В.Ф. Сухомейло 29 августа (рис. 7, е) и на аэрофотоснимке 8 сентября (см. рис. 7, а, площадь 0,63 тыс. м²). На аэрофотоснимке 17.08.1983 г. площадь озера составляла 0,77 тыс. м² (см. рис. 7, б). Озеро было в июле 1985 г. (см. рис. 7, ж), но в 1988 г. оно отсутствовало (см. рис. 7, в). Не было признаков существования озера на ортофотоплане 1997 г. Максимальная площадь (4,54 тыс. м²) установлена по космоснимку 20.07.2007 г., когда с озера был поверхностный сток. 31 марта 2009 г. озера не было (фото Я. Бережко). В 2009 г. озеро определяется на фотографиях Я. Бережко 27, 29, и 30 августа, на космоснимке 19 сентября (см. рис. 7, з). Но на космоснимке 16.10.2009 г. озеро отсутствовало (см. рис. 7, д). 30 июля 2010 г. озеро определяется на космоснимке Landsat-5, но 8 августа его не было, как и на фотографии Я. Бережко 23.08.2010 г. На последующих космоснимках и фотографиях озеро отсутствует. Приблизительный объем озера в 2009 г. в сравнении с топокартой 2012 г. составил 18–20 тыс. м³, глубина около 10 м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований были выявлены озера, существовавшие в разное время около ледника Большой Азау и на самом леднике, и существующие в настоящее время, определены их параметры и особенности динамики как многолетней, так и сезонной, в том числе в сравнении с другими озерами в разных районах. На основе полученных данных сделаны следующие выводы.

1. Площади выявленных озер невелики: до 1 тыс. м² – 4 озера, 1–5 тыс. м² – 7 озер, 5–10 тыс. м² – 2 озера, более 10 тыс. м² – 2 озера. Исходя из площади озера, по-разному оценивается опасность прорыва. В работе [Rinzin et al., 2021] минимальный порог площади прорывоопасных озер составил 50 тыс. м². Для озер менее 50 тыс. м² индекс опасности прорыва низкий. При составлении нового каталога ледников России [Хромова и др., 2021] ледниковые озера принято считать опасными, если их площадь более 5 тыс. м². По этим критериям к опасным можно отнести 4 озера (№ 11–14).

2. По расположению относительно ледника выявленные озера можно отнести к перигляциальным (на расстоянии до 2 км от ледника – № 1–3, 5–8), прогляциальным (на контакте с ледником – № 10, 15) и супрагляциальным (на поверхности ледника или мертвого льда – № 4, 9, 11–14). На начальном этапе формирования прогляциальными были озера № 5–9.

3. По типу плотин озера можно объединить в следующие группы: с моренно-ригельными (№ 1–3, 5–8), ледниковыми (№ 10, 15) прогляциальных озер, ледниковыми по всему периметру

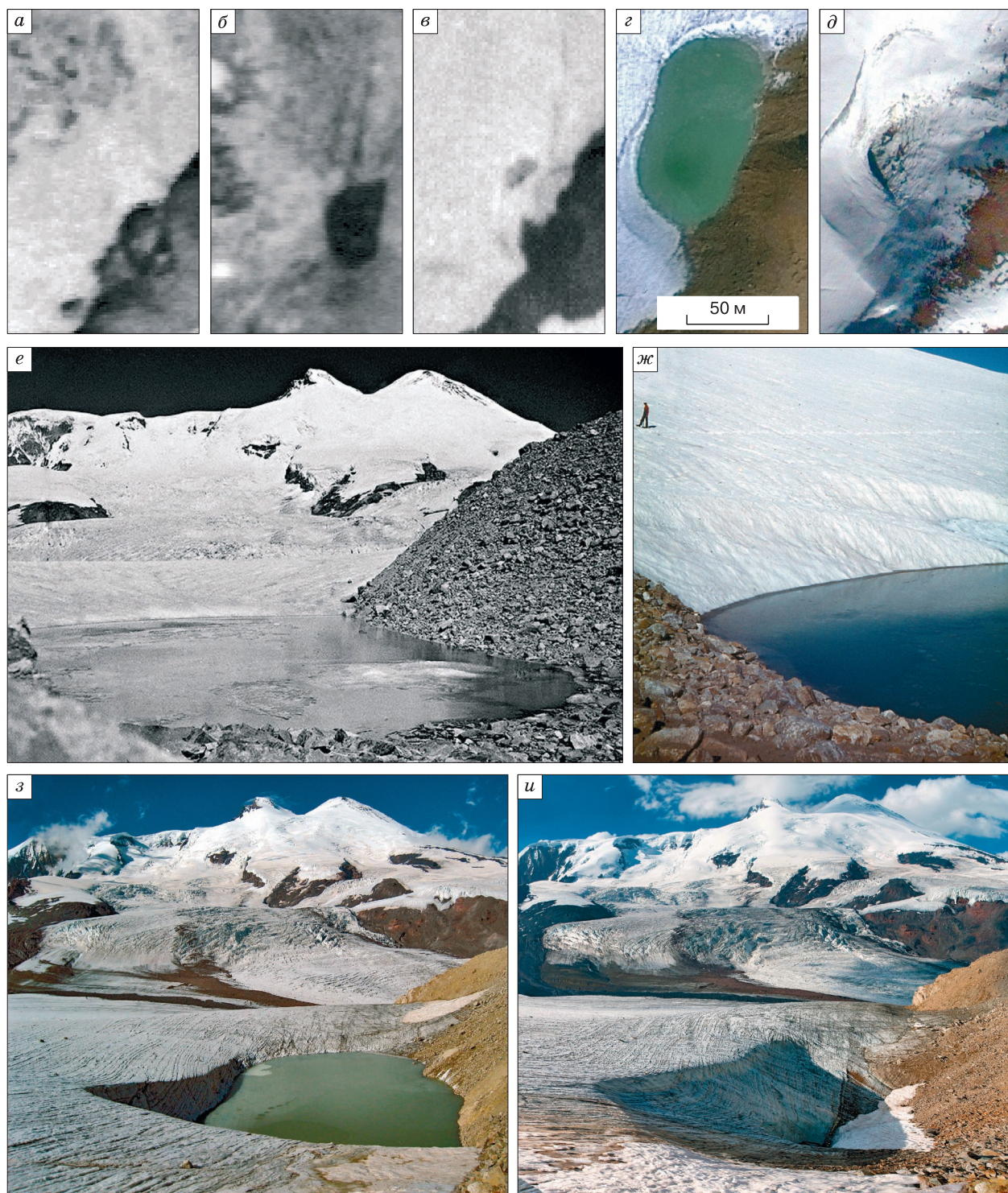


Рис. 7. Озеро № 15 на перевале Эхо Войны:

a – аэрофотоснимок (08.09.1973); *б* – аэрофотоснимок (17.08.1983); *в* – аэрофотоснимок (27.07.1988); *г* – космоснимок GeoEye-1 (19.09.2009); *д* – космоснимок GeoEye-1 (16.10.2009); *е* – фотография В.Ф. Сухомейло (29.08.1973); *ж* – фотография “uz89” (июль 1985 г.); *з* – фотография Я. Бережко (27.08.2009); *и* – фотография Я. Бережко (04.08.2012).

супрагляциальных озер и снежно-ледяными (№ 4, 9, 11–14) плотинами. Моренно-ригельные плотины устойчивы к размыву и оползанию, и динамика озер, ограниченных ими, определяется балансом притока воды вследствие выпадения жидких осадков на водосборе, таяния снега и льда и оттока воды из котловин по подземным фильтрационным каналам стока. Этим объясняется исчезновение озер в осенне-зимний период, когда фильтрация воды из озер в дно котловин продолжалась при отсутствии притока воды в котловины.

Ледниковые плотины прогляциальных озер препятствовали стоку воды из озер до тех пор, пока не сформировались подледные каналы стока, что приводило также к исчезновению озер в осенне-зимний период. Это наблюдалось на озере № 15 – оно отсутствовало в марте 2009 г. (фото Я. Бережко), но в летний период озеро появилось вновь (космоснимок 19.09.2009). В дальнейшем с отступанием ледника на низкие высотные уровни и уменьшением его толщины котловины прогляциальных озер № 10 и 15 как таковые нивелировались и озера больше не появлялись. У озера № 15 был период, когда у ледника увеличивался баланс массы (в конце 1980-х–середине 1990-х гг.) и котловина заполнялась льдом.

Снежно-ледяные плотины ежегодно образовывались у супрагляциальных озер № 9, 11, 13 и 14. Озера существовали в мае–июне, когда сохранялся снежный покров до тех пор, пока эти плотины не размывались концентрированными потоками талых вод или не таяли. До этого был период (как показала динамика молодого озера № 13), когда на поверхности ледника в результате просадки льда образовывалась мульда, и в это время сток из нее осуществлялся по подледному каналу, но параллельно был и поверхностный сток по леднику. В это время озеро № 13 существовало и во второй половине лета (2019–2020 гг.). У супрагляциального озера № 12 плотина – ледниковая, но подледный канал стока мог блокироваться сезонными снежно-ледяными массами или сползшими со стенок котловины обломочными массами.

4. Развитие супрагляциальных озер и их прорывы охарактеризованы в работах по исследованию озер ледяных щитов Гренландии и Антарктиды [Legleiter et al., 2014; Dirscherl et al., 2021; Corr et al., 2022], а также озер ледников в Гималаях, Тибете и других горных районах, в том числе в статье о прорыве супрагляциального озера объемом более 1 млн м³ на леднике Халджи в долине Лими [Kropáček et al., 2015]. Количество супрагляциальных озер на одном леднике может быть очень большим, например, на леднике Чапдара в бассейне р. Гунт на Памире авторами выявлено более 140 супрагляциальных озер, наибольшее из которых имеет площадь около 8 тыс. м².

5. По данным [Kutuzov et al., 2019], на участке ледника Большой Азау, где существуют озера № 12–14, толщина льда превышает 100 м. В этом месте отмечено переуглубление подледного рельефа [Лаврентьев и др., 2020], где возможно развитие подледникового озера, а при продолжающейся деградации ледника и крупного озера на поверхности остаточных мертвых льдов. В этой связи предполагается формирование супрагляциальных озер с объемами намного большими, чем у существующих. Их прорывы могут быть каскадными с вовлечением в прорывной паводок водных масс нескольких супрагляциальных и подледниковых озер. В настоящее время актуально продолжение космического мониторинга ледниковых озер, проведение наземных георадарных исследований ледника, изучение взаимодействия массивов мертвых льдов и супрагляциальных озер и моделирование возможных прорывных паводков.

Благодарности. Авторы выражают благодарность ГК “СКАНЭКС” и Научно-исследовательскому центру космической гидрометеорологии “Планета” за предоставленные космоснимки, Я. Бережко, А. Лебедеву, К. Лагодиевко, В.Ф. Сухомейло – за предоставленные фотографии.

Работа выполнена по Плану научно-исследовательских и технологических работ научно-исследовательских учреждений Росгидромета в рамках темы 6.3.2 АААА-А20-120031990040-7 и в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

Литература

- Атлас ледников Эльбруса. Ч. 3. Общегеографические карты. М., Изд-во Моск. ун-та, 1965.
- Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Тапилова А.А. Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа // Фундамент. и прикл. климатология, 2021, т. 7, № 3, с. 113–141.
- Васильчук Ю.К., Чигова Ю.Н., Буданцева Н.А., Мухина Ю.С. Быстрое сокращение ледника Большой Азау в Приэльбрусье на фоне стабильных климатических условий и возникающие при этом риски // Геориск, 2010, № 2, с. 16–29.
- Герасимов А. О прорыве ледникового озера на NO склоне Эльбруса // Изв. Геолог. Комитета, 1909, т. 28, № 7, с. 156–160.
- Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Багов А.М., Маркина А.В. О перестройке гидрографической сети северо-восточного подножия Эльбруса // Лед и снег, 2012, т. 52, № 2, с. 23–30.
- Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Беккиев М.Ю. и др. Эволюция озер у ледника Джикигангез (Северное Приэльбрусье) в 1957–2020 гг., с учетом подземных каналов стока // Лед и снег, 2022, т. 62, № 1, с. 47–62.

Докукин М.Д., Хаткутов А.В. Озера у ледника Малый Азау на Эльбурсе: динамика и прорывы // *Лед и снег*, 2016, т. 56, № 4, с. 472–479.

Докукин М.Д., Шагин С.И. Особенности динамики ледниковых озер с подземными каналами стока (анализ разновременной аэрокосмической информации) // *Криосфера Земли*, 2014, т. XVIII, № 2, с. 47–56.

Иванов М.А. В ущелье р. Баксана // *Изв. Императорского Рус. геогр. о-ва*, 1902, т. XV, с. 7–20.

Лаврентьев И.И., Петраков Д.А., Кутузов С.С. и др. Оценка потенциала развития ледниковых озер на Центральном Кавказе // *Лед и снег*, 2020, т. 60, № 3, с. 343–360.

Сейнова И.Б. Ледники и сели Приэльбрусья (Эволюция оледенения и селевой активности) // И.Б. Сейнова, Е.А. Золотарев. М., Науч. мир, 2001, 204 с.

Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф. и др. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // *Лед и снег*, 2021, т. 61, № 3, с. 341–358.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А. и др. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // *Криосфера Земли*, 2018, т. XXII, № 2, с. 70–80.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В. и др. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне г. Эльбрус 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // *Материалы гляциол. исслед.*, 2007, № 102, с. 225–229.

Allen S.K., Rastner P., Arora M. et al. Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition // *Landslides*, 2016, No. 13, p. 1479–1491.

Corr D., Leeson A., McMillan M., Zhang C., Barnes T. An inventory of supraglacial lakes and channels across the West Antarctic Ice Sheet // *Earth System Sci. Data*, 2022, No. 14, p. 209–228.

Dirscherl M.C., Dietz A.J., Kuenzer C. Seasonal evolution of Antarctic supraglacial lakes in 2015–2021 and links to environmental controls // *The Cryosphere*, 2021, vol. 15, p. 5205–5226.

Emmer A. GLOFs in the WOS: bibliometrics, geographies and global trends of research on glacial lake outburst floods (Web of Science, 1979–2016) // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2018, vol. 18, p. 813–827.

Kropáček J., Neckel N., Tyrna B. et al. Repeated glacial lake outburst flood threatening the oldest Buddhist monastery in north-western Nepal // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2015, vol. 15, p. 2425–2437.

Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A. et al. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017 // *Frontiers in Earth Science*, 2019, vol. 7, art. 153.

Legleiter C.J., Tedesco M., Smith L.C. et al. Mapping the bathymetry of supraglacial lakes and streams on the Greenland ice sheet using field measurements and high-resolution satellite images // *The Cryosphere*, 2014, vol. 8, p. 215–228.

Mergili M., Pudasaini S.P., Emmer A. et al. Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru) // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2020, vol. 24, p. 93–114.

Rinzin S., Zhang G., Wangchuk S. Glacial lake area change and potential outburst flood Hazard assessment in the Bhutan Himalaya // *Frontiers in Earth Sci.*, 2021, vol. 9, art. 775195.

URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> / Sentinel Hub EO Browser (дата обращения: 04.12.2022).

URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> / Earth Explorer (дата обращения: 04.12.2022).

URL: http://goto.arcgisonline.com/maps/World_Imagery/ / World Imagery Map (дата обращения: 04.12.2022).

URL: <https://risk.ru/blog/198343/> / Впервые к Эльбурсу или семейный переход через перевал Хотютау в 1985 году (дата обращения: 04.12.2022).

References

Atlas lednikov Elbrusa [Atlas of Elbrus glaciers. Pt III. General geographical maps]. Moscow, Izd-vo Mosk. Un-ta, 1965 (in Russian).

Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.Kh., Tashilova A.A. Modern degradation of valley glaciers in the Central Caucasus. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya* [Fundamental and Applied Climatology], 2021, vol. 7, No. 3, p. 113–141 (in Russian).

Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Ju.N., Budantseva N.A., Mukhina Ju.S. Fast retreat of the Bolshoy Azau Glacier in the Elbrus area in stable climatic conditions and associated risks. *Georisk* [Georisk], 2010, No. 2, p. 16–29 (in Russian).

Gerasimov A. About the breakthrough of the glacial lake on the NO slope of Elbrus. *Izv. Geologich. Komiteta* [Proceedings of the Geological Committee], 1909, vol. 28, No. 7, p. 156–160 (in Russian).

Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bagov A.M., Markina A.V. On the restructuring of drainage network of the base of Mount Elbrus. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2012, vol. 52, No. 2, p. 23–30 (in Russian).

Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bekkiev M.Y. et al. Evolution of lakes near the Dzhikiugankez glacier (Northern Elbrus area) in 1957–2020 with consideration of underground flow channels. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2022, vol. 62, No. 1, p. 47–62 (in Russian).

Dokukin M.D., Khatkutov A.V. Lakes near the glacier Maliy Azau on the Elbrus (Central Caucasus): dynamics and outbursts. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2016, vol. 56, No. 4, p. 472–479 (in Russian).

Dokukin M.D., Shagin S.I. The specific features of the behavior of glacial lakes with underground drain channels (analysis of multitemporal aerospace information). *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, No. 2, p. 41–50.

Ivanov M.A. In the Baksan gorge. In: *Proc. of the Imperial Russian Geographical Society*, 1902, vol. XV, p. 7–20 (in Russian).

Lavrentiev I.I., Petrakov D.A., Kutuzov S.S. et al. Assessment of glacier lakes development potential in the Central Caucasus. *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2020, vol. 60, No. 3, p. 343–360 (in Russian).

Seynova I.B., Zolotarev E.A. *Ledniki i seli Prielbrusiiya* (Evolyutsiya oledineniya i selevoi aktivnosti) [The glaciers and the debris flows of the Elbrus Region]. Moscow, Nauchny Mir, 2001, 204 p. (in Russian).

Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F. et al. New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Led i Sneg* [Ice and Snow], 2021, vol. 61, No. 3, p. 341–358 (in Russian).

Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Aleynikov A.A. et al. The outburst of Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017. *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XX, No. 2, p. 61–70.

Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Tutubalina O.V. et al. Breakthrough of a glacial lake on the northeastern slope of

- Elbrus August 11, 2006: Forecast, Event and Consequences Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy [Data of Glaciological Studies], 2007, No. 102, p. 225–229 (in Russian).
- Allen S.K., Rastner P., Arora M. et al. Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition. Landslides, 2016, No. 13, p. 1479–1491.
- Corr D., Leeson A., McMillan M., Zhang C., Barnes T. An inventory of supraglacial lakes and channels across the West Antarctic Ice Sheet. Earth System Science Data, 2022, No. 14, p. 209–228.
- Dirschel M.C., Dietz A.J., Kuenzer C. Seasonal evolution of Antarctic supraglacial lakes in 2015–2021 and links to environmental controls. The Cryosphere, 2021, vol. 15, p. 5205–5226.
- Emmer A. GLOFs in the WOS: bibliometrics, geographies and global trends of research on glacial lake outburst floods (Web of Science, 1979–2016). Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2018, vol. 18, p. 813–827.
- Kropáček J., Neckel N., Tyrna B. et al. Repeated glacial lake outburst flood threatening the oldest Buddhist monastery in north-western Nepal. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2015, vol. 15, p. 2425–2437.
- Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A. et al. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017. Frontiers in Earth Science, 2019, vol. 7, article 153.
- Legleiter C.J., Tedesco M., Smith L.C. et al. Mapping the bathymetry of supraglacial lakes and streams on the Greenland ice sheet using field measurements and high-resolution satellite images. The Cryosphere, 2014, vol. 8, p. 215–228.
- Mergili M., Pudasaini S.P., Emmer A. et al. Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). Hydrol. Earth Syst., 2020, vol. 24, p. 93–114.
- Rinzin S., Zhang G., Wangchuk S. Glacial lake area change and potential outburst flood Hazard assessment in the Bhutan Himalaya. Frontiers in Earth Science, 2021, vol. 9, article 775195.
- URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> / Sentinel Hub EO Browser (last visited: 04.12.2022).
- URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> / Earth Explorer (last visited: 04.12.2022).
- URL: http://goto.arcgisonline.com/maps/World_Imagery/ / World Imagery Map (last visited: 04.12.2022).
- URL: <https://risk.ru/blog/198343/> / For the first time to Elbrus or a family crossing over the Khotyutau pass in 1985 (last visited: 04.12.2022).

*Поступила в редакцию 10 февраля 2022 г.,
после доработки – 3 октября 2022 г.,
принята к публикации 7 декабря 2022 г.*