

Эволюция озёр у ледника Джикиуганкез (Северное Приэльбрусье) в 1957–2020 гг. с учётом подземных каналов стока

© 2022 г. М.Д. Докукин^{1*}, Е.А. Савернюк², М.Ю. Беккиев¹, Р.Х. Калов¹, А.В. Хаткутов¹

¹Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия;

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*inrush@bk.ru

Evolution of lakes near the Dzhikiugankez glacier (Northern Elbrus area) in 1957–2020 with consideration of underground flow channels

M.D. Dokukin^{1*}, E.A. Savernyuk², M.Yu. Bekkiev¹, R.Kh. Kalov¹, A.V. Khatkutov¹

¹High Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia; ²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*inrush@bk.ru

Received September 9, 2021 / Revised November 11, 2021 / Accepted December 23, 2021

Keywords: *Elbrus, Dzhikiugankez Glacier, glacier degradation, satellite images, glacial lakes, lake outburst, underground runoff channels.*

Summary

Evolution of lakes near the Dzhikiugankez Glacier in the north of Elbrus for the period of 1957–2020 was studied using a comparative interpretation of aerial and satellite images as well as aerial and ground surveys in 2007–2018. Within this period the area of the Dzhikiugankez Glacier (43,35 N, 42,53 E) decreased by 8.2 km². On the territory previously occupied by the glacier and close to it, 19 lakes appeared at different times, which dynamically developed and broke through. The lakes cover the area of 0.43 km², that equals to 5.21% of the total ice-free area. The average area of the lakes is 26.6 thousand m². The maximum (the lake East Birdzhaly) is 89 thousand m². In total there were six lakes larger than 25 thousand m². They are concentrated in depressions on the surface of an ancient lava flow dammed by glaciers, dead ices and moraine lines. At a certain stage in the evolution of lakes, water from them penetrated through these barriers and, thus, formed subglacial and underground drainage channels. In 2013, during helicopter flights, an underground drainage channel with a length of more than 80 m was detected in the moraine line around the Lake «Podkova». The survey made possible to determine decreasing in the lake level by 2 m, and the accumulation of water with a volume of up to 48 thousand m³ in the cavities of the moraine massif, until it reaches the outer slope. The accumulated volume of water interflowed through the underground channel gradually, but despite the pot-holes on its bottom, no mudflow happened in the valley. Although in another case, the formation of an underground drainage channel from the Severnoye Chungurchat Lake was accompanied by a lake breakthrough and a mudflow. Other characteristic features of the evolution of lakes and changes in the direction of drainage from glaciers are also analyzed in the paper.

Citation: Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Khatkutov A.V. 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, 62 (1): 47–62. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422010115.

Поступила 9 сентября 2021 г. / После доработки 11 ноября 2021 г. / Принята к печати 23 декабря 2021 г.

Ключевые слова: *Эльбрус, ледник Джикиуганкез, деградация ледников, космические снимки, ледниковые озёра, прорыв озера, подземные каналы стока.*

По данным дешифрирования аэрофотоснимков и космических снимков за 1957–2020 гг., а также полевых наблюдений и вертолётных облётов определены особенности эволюции озёр у ледника Джикиуганкез и механизмы их прорыва, в том числе по подземным каналам. На примере озёр Подкова, Северное Чунгурчат и Балык Южное показано, что формирование подземных каналов стока не обязательно приводит к сходу селевых потоков, однако даже небольшие озёра могут быть очагами значительных селей.

Введение

Серьёзная угроза для населения и объектов в горах, а также для развития индустрии отдыха и туризма — ледниковые озёра из-за опасности их прорыва и формирования катастрофических

паводков и селевых потоков. В современных условиях изменения климата, когда наблюдаются высокие темпы деградации ледников и образование новых озёр, это особенно актуально. Растущие темпы освоения горных территорий диктуют необходимость объективных оценок

опасности прорыва озёр. Недоучёт опасности прорыва озера и возможных последствий приводит к разрушению объектов, человеческим жертвам и большому экономическому ущербу, а завышение опасности – к излишним затратам на защитные сооружения и мероприятия, а также нерациональному землепользованию. Накопление данных о динамике ледниковых озёр в периоды, предшествующие прорывам, имеет большое практическое значение для прогнозов и оценок опасности прорывов озёр. Тематике прорывов ледниковых озёр посвящено много публикаций (в базе данных Web of Science, согласно [1], в период 1979–2016 гг. есть 892 статьи). Прорывы озёр происходят и в последние годы [2, 3]. Число жертв от катастроф, связанных с прорывами озёр, достигало 4–6 тыс. человек [4, 5]. На Кавказе катастрофическим был прорыв оз. Башкара в 2017 г. [6].

В настоящей статье авторы попытались показать возможности использования разновременной аэрокосмической информации для изучения закономерностей развития ледниковых озёр и механизмов их прорыва на примере анализа динамики озёр у ледника Джикиуганкез в Северном Приэльбрусье (бассейн р. Малка, верховья рек Бирджалы-Су и Кара-Кая-Су).

Исходные материалы и методы

В данной работе использованы аэрофотоснимки, космические снимки, топографические карты и ортофотопланы, наземные фотографии и фотографии с вертолётных облётов (табл. 1). Космические снимки и аэрофотоснимки трансформировали (привязывались по опорным точкам) и приводили к системе координат WGS 84 в проекции UTM зона 38N в программе ArcMap 10.7, в которой отрисовывали электронные слои контуров озёр и определяли их площади. Фотографии с вертолётных облётов привязывали друг к другу по опорным точкам без географической привязки. С целью выявления изменений в состоянии озёр, ледников, моренных массивов, мёртвых и погребённых льдов проводилось сравнительное дешифрирование разновременных снимков с применением инструмента «Зашторить слой» (Swipe Layer) для интерактивного отображения разновремен-

ных слоёв в программе ArcMap, а также в режиме GIF-анимации в программе Easy GIF Animator Pro. Типы поверхности склонов, формы денудации, водной и ледниковой эрозии и аккумуляции на космических снимках и аэрофотоснимках идентифицировали по характерным дешифровочным признакам с учётом изменений, выявленных на разновременных аэрофото- и космоснимках, и по материалам полевых наблюдений разных лет в совокупности с данными вертолётных снимков разных ракурсов.

Изученность района исследований

Северное Приэльбрусье изобилует ледниковыми озёрами, что отличает этот район от других на Кавказе. Паводки и селевые потоки, вызванные прорывами озёр, наносили ущерб лечебно-оздоровительному учреждению «Эльбрус», ранее имевшему неофициальный статус народного курорта «Джилы-Су». В литературе детально описаны два случая прорывов озёр – в 1909 и 2006 гг. [7, 8]. Целый ряд публикаций по озёрам Северного Приэльбрусья появился после экспедиции в 2005 г. с участием специалистов МГУ имени М.В. Ломоносова, Кубанского государственного университета, Северо-Кавказского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Высокогорного геофизического института (ВГИ), Кабардино-Балкарского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [9–11], во время которой было обнаружено много новых озёр по сравнению с топографической картой.

В следующей комплексной экспедиции 2006 г. сотрудниками географического факультета МГУ были проведены геодезические и батиметрические съёмки и обнаружена явная угроза прорыва оз. Бирджалы-Чиран-2006–5 [12], прорыв которого произошёл 11.08.2006 г. переливом через ледяную перемычку. В результате сформировался селевой поток, параметры которого оценены сотрудниками института «Севкавгипроводхоз» – максимальный расход составил $125 \text{ м}^3/\text{с}$ [13].

В 2007 и 2009 гг. специалисты МГУ проводили батиметрические съёмки озёр Подкова и Северное Бирджалы (Кривое, Снежниковое, по [15]) [14, 15]. Дальнейшие исследования района озёр выполняли сотрудники ВГИ с проведе-

Таблица 1. Характеристика использованных материалов

Материалы	Дата	Масштаб, разрешение, м (МС/Панхр.)*	Источник, правообладатель
Аэрофотоснимки	22.08.1957, 23.07.1974, 10.07.1977, 09.08.1978, 1979, 22.08.1980, 09.09.1980, 1982, 28.09.1987	1:15 000, 1:25 000	Архив Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт»
Топографические карты	1958	1:10 000	Атлас ледников Эльбруса. Лист В. А. В. Брюханов, И.А. Лаппо (Лабутина), Б.М. Фаминцын
	1957	1:25 000	Карта Генерального штаба
Ортофотоплан	1997	1:10 000	И.А. Лабутина, Е.А. Золотарёв и др.
<i>Космические снимки</i>			
Landsat-5	30.09.1992, 15.07.1993, 01.09.1993	82,6/30	Earth Explorer https://earthexplorer.usgs.gov/
Landsat-7	09.08.1999, 12.09.2000	30/15	
Международная космическая станция	¹ 25.08.2002, ² 20.07.2012	—	¹ Программа Института географии РАН «Ураган»; сайт НАСА https://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/photo.pl?mission=ISS005&roll=E&frame=11193 ² Сайт НАСА https://eol.jsc.nasa.gov/SearchPhotos/photo.pl?mission=ISS032&roll=E&frame=8481
IRS 1C/1D**	¹ 14.09.2004, ² 01.08.2006, 11.08.2006	23/5,8	¹ © 2003–2007 ANTRIX ² © 2006 National Remote Sensing Centre, Department of Space, Government of India
IRS P5**	12.09.2007	/2,5	© 2003–2007 ANTRIX
SPOT 4**	05.09.2010	20/10	© CNES 2010
SPOT 5**	21.09.2011	10/2,5	© CNES 2011
GeoEye-1	10.09.2013	1,64/0,41	World Imagery Map https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer
Sentinel-2	2015–2021	20/10	Sentinel Hub EO Browser https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/
Ресурс П	17.07.2016	3/1	Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА»
Канопус В4	14.09.2020	10,5/2,1	
<i>Фотографии</i>			
Наземные	2007, 2008, 2010, 2016	—	М.Д. Докукин, Е.А. Савернюк
Вертолётные	¹ 1980, ² 1981, ³ 1988, ⁴ 2004, 2006, ⁵ 2011–2018		¹ Ю.Г. Ильичёв, ² И.Б. Сейнова, ³ М.Д. Докукин, ⁴ Научно-производственное предприятие «InfoTERRA», ⁵ М.Д. Докукин, Е.А. Савернюк

*МС – мультиспектральный диапазон, Панхр. – панхроматический диапазон; **космические снимки IRS и SPOT любезно предоставлены Инженерно-технологическим центром «СканЭкс»; «—» снимки, сделанные различными моделями цифровых и зеркальных камер.

нием маршрутных экспедиций в 2007, 2008, 2010 и 2016 гг., вертолётных облётов в 2009–2018 гг. и с использованием материалов дешифрирования аэрофотоснимков и космических снимков [16–18]. В результате исследований выявлены случаи прорывов озёр: Северное Бирджалы – в 1957–1974 гг., Северное Чунгурчат – в 1970–80-х годах, Южное Чунгурчат – в 1993 г., Среднее Бирджалы – в 2003 г., Подкова – в 2013 г. (частичный прорыв), а также исчезновения и обмеления озёр без прорывов. Установлено влияние кратковременного наступания ледников в начале 1990-х

годов на формирование озёр Среднее Бирджалы и Восточное Бирджалы [16, 17]. На основе сравнения космоснимков до прорыва, в момент прорыва (11.08.2006 г.) и после прорыва и данных батиметрии оз. Восточное Бирджалы определены скорость донной эрозии ледяной гряды плотины (0,6 м/ч) и средний расход прорывного паводка (12,7 м³/с) [17]. Обнаружено, что прорывы озёр происходили поверхностным (в основном наледным), подледным и подземным способами. Сделано предположение о будущей перестройке гидрографической сети в результате ухода части

стока р. Бирджалы-Су (правая составляющая) в р. Кара-Кая-Су на участке ледяной гряды срединной морены, разделявшей бассейны этих рек [17]. Оно подтвердилось полевыми наблюдениями 2016 г., данными облётов 2018 г. и современными космоснимками.

Данные о динамике ледников Эльбруса, в том числе ледника Джикиуганкез, приведены в работах [19–22], в которых показано, что в последние годы темпы деградации возросли в 3–5 раз, а максимальное сокращение площади отмечалось у ледников Джикиуганкез и Большой Азау.

Озёра у ледника Джикиуганкез в 1957–2020 гг.

На основе анализа разновременной аэрокосмической информации авторами составлена схема озёр, образовавшихся в результате деградации ледника Джикиуганкез (рис. 1). На ней номерами показаны озёра, названия и параметры

которых приведены в табл. 2. Площадь ледника Джикиуганкез с 1957 по 2020 г. уменьшилась на 8,12 км² [22], что составило 29,2% по сравнению с его состоянием в 1957 г. – 27,8 км² [23]), и он распался на два ледника – Бирджалычиран и Чунгурчатчиран. На территории, ранее занятой ледником Джикиуганкез и прилегающей к нему, в разное время возникло 19 озёр, которые динамично развивались и прорывались. Площадь четырёх озёр, существовавших перед ледником в 1957 г., составляла около 0,08 км² (15,4% всей площади озёр у ледника Джикиуганкез). Три озера находились в тыловой зоне каменного глетчера, примыкавшего к леднику. На территории, освободившейся от ледника в период 1957–2020 гг., образовалось 12 озёр общей площадью 0,43 км², что составило 5,21% этой территории. Средняя площадь озёр – 26,6 тыс. м². Максимальная площадь – 89 тыс. м² – у оз. Восточное Бирджалы (№ 10 на рис. 1). Всего было шесть озёр крупнее 25 тыс. м². Озёра концентрировались на участке

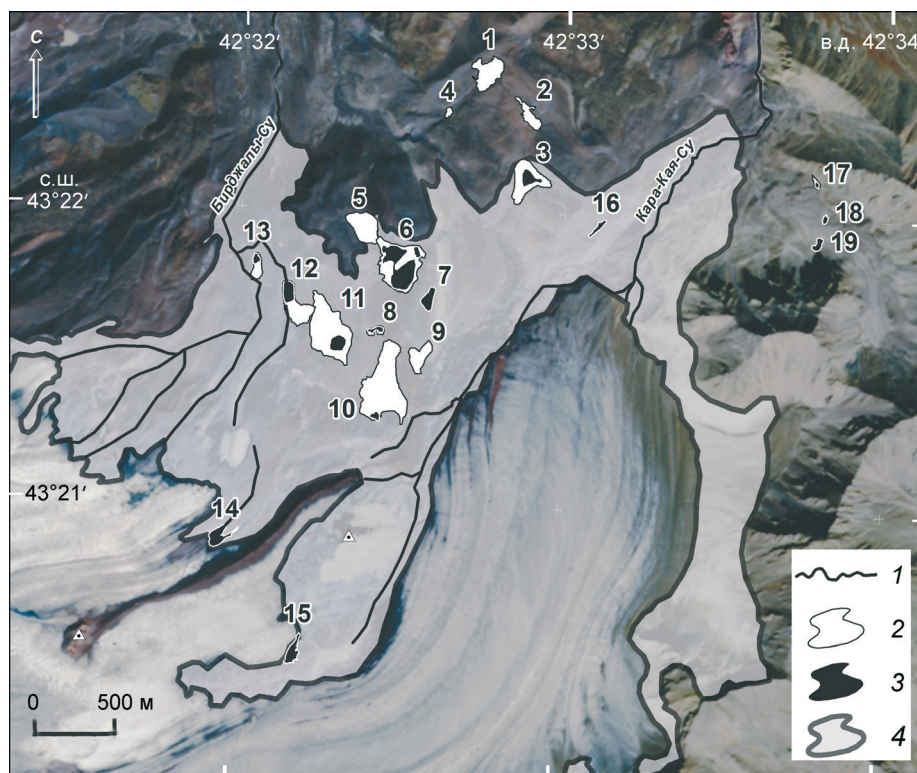


Рис. 1. Озёра у ледника Джикиуганкез в 1957–2020 гг.:

1 – русла потоков талых ледниковых вод; 2 – максимальные границы озёр в прошлом; 3 – современные максимальные границы озёр; 4 – площадь, занятая ледником в 1957 г. (полупрозрачный контур); 1–19 – номера озёр

Fig. 1. Lakes near the Dzhikiugankez Glacier in 1957–2020:

1 – channels of streams of melt glacial waters; 2 – largest boundaries of lakes in the past; 3 – modern maximum boundaries of lakes; 4 – area covered by a glacier in 1957 (translucent outline); 1–19 – ordinal numbers of lakes

Таблица 2. Озёра у ледника Джикигутанкез в разные годы и их динамика

Номер на рис. 1	Название озера	Координаты	Максимальная площадь, тыс. м ² (год)	Сезонная площадь мин./макс., тыс. м ²	Плотина озера	Механизм прорыва, исчезновения	Факт селя или паводка
1	Северное Чунгурчат	43°23'28,32"с.ш. 42°32'36,23"в.д.	27,0 (1980)	Исчезло после 1983 г.	Конечно-моренный вал с ледяным ядром	А. Подземный. Б. Поверхностный, обрушение моренных масс	А. Сель в верховьях (1973 г.) и в районе источников (1983 г.). Б. Сель в верховьях (1980 г.)
2	Среднее Чунгурчат	43°23'19,85"с.ш. 42°32'49,21"в.д.	12,4 (1980)	Исчезло после 2009 г.	Моренный массив с ледяным ядром	В результате формирования подземного канала стока и отсутствия притока воды	Нет
3	Южное Чунгурчат	43°23'06,81"с.ш. 42°32'49,65"в.д.	35,7 (1987)	0/8,1 после 1993 г.	Ледяная гряда средней морены	Поверхностный	Сель в районе источников (1993 г.)
4	Западное Чунгурчат	43°23'20,16"с.ш. 42°32'27,29"в.д.	2,3 (1980)	Исчезло после 1980 г.	Моренные и русловые валы	Плотина размыта селем, сошедшим с озера № 1	Дополнительный источник воды для селя
5	Северное Бирджалы 1	43°22'56,97"с.ш. 42°32'06,30"в.д.	29,2 (1957)	Исчезло после 1974 г.	Ледяная гряда срединной морены	Подлёдный	Сель в районе источников (1973 г.)
6	Северное Бирджалы 2	43°22'47,70"с.ш. 42°32'15,60"в.д.	68,1 (2014)	37,6/56,9			
7	Северо-Восточное Бирджалы (Треугольное)	43°22'42,56"с.ш. 42°32'22,87"в.д.	8,0	0/5,5	Моренно-ригельная	Нет	Нет
8	Промежуточное Бирджалы	43°22'35,94"с.ш. 42°32'08,96"в.д.	4,4 (2006)	0/2,6			
9	Оз. Аристова	43°22'29,42"с.ш. 42°32'20,76"в.д.	16,1 (1999)	Исчезло после 1999 г.	Ледяная гряда срединной морены		Нет сведений (1999 г.)
10	Восточное Бирджалы	43°22'21,94"с.ш. 42°32'12,70"в.д.	89,0 (2006)	0/2,3 после 2011 г.		Поверхностный	Сель в районе источников (2006 г.)
11	Среднее Бирджалы	43°22'32,13"с.ш. 42°31'57,76"в.д.	74,2 (2002)	0/8,5 после 2003 г.	Ледник, боковая морена		Паводок и сель (2003 г.) в районе источников
12	Подкова	43°22'41,84"с.ш. 42°31'43,93"с.ш.	29,2 (2011)	2,5/8,4 2020 г.	Моренный вал	Подземный, частичный, уменьшение площади из-за заноса флювиогляциальными отложениями	Микросель (2013 г.)
13	Западное Бирджалы	43°22'49,32"с.ш. 42°31'34,55"в.д.	8,7 (2002)	0/2,3 после 2007 г.	Моренно-ригельная	Уменьшение площади из-за изменения направления притока воды и заноса флювиогляциальными отложениями	Нет
14	Юго-Западное Бирджалы	43°21'53,83"с.ш. 42°31'26,34"в.д.	10,8 (2021)	10,8/10,8	Мёртвый лёд	Нет	
15	Южное Бирджалы	43°21'28,11"с.ш. 42°31'48,28"в.д.	11,7 (2021)	11,7/11,7	Ледник		
16	Юго-Восточное Чунгурчат (Длинное)	43°22'57,57"с.ш. 42°33'09,58"в.д.	3,2 (2007)	0/3,2	Моренный вал	Поверхностный, сползание моренных масс плоскостями	Сель в 2006 г. в верховьях р. Кара-Кая-Су [13]
17	Балык Северное	43°23'07,91"с.ш. 42°34'10,43"в.д.	2,1 (1978)	0/0,9 после 1978 г.			
18	Балык Среднее	43°23'01,07"с.ш. 42°34'12,91"в.д.	1,4 (2014)	0/1,4	Каменный глетчер	Нет	Нет
19	Балык Южное	43°22'55,43"с.ш. 42°34'11,13"в.д.	3,5 (2006)	0/3,5		Подземный	Сель с площадью отложений до 12 тыс. м ² в верховьях р. Кара-Кая-Су

древнего лавового потока, в углублениях на его поверхности, подпруженных ледниками, мёртвыми льдами и моренными валами. На определённом этапе эволюции озёр вода из них проникала сквозь эти преграды, что приводило к формированию подлёдных и подземных каналов стока. Подлёдный канал стока образовался у оз. Северное Бирджалы (№ 5 на рис. 1) в 1957–1974 гг., в результате чего озеро исчезло. Подземные каналы стока в разное время сформировались у озёр Северное Чунгурчат (№ 1 на рис. 1), Среднее Чунгурчат (№ 2 на рис. 1), Подкова (№ 12 на рис. 1), Балык Южное (№ 19 на рис. 1).

В 2020 г. насчитывалось 14 озёр общей площадью около 0,11 км². Часть из них не имеет притока с ледника, существует в основном за счёт талых вод снежников и к началу – середине августа исчезает (№ 3, 7, 11, 16, 18 на рис. 1), фильтруясь в дно котловин и в трещины в массиве лавового потока. В результате таяния и деградации многолетнего снежника (источника водного питания) уменьшилась площадь оз. Северное Бирджалы (№ 6 на рис. 1) с 63,5 тыс. м² в 2014 г. (без учёта площади острова) до 37,6 тыс. м² в 2020 г. Повышенная снежность и накопление метелевого снега в 2021 г. привели к увеличению площади озера к началу августа до 51,3 тыс. м² (остров на озере не учитывался). Значительно уменьшилось в размерах оз. Подкова. Всё лето остаются неизменными и постепенно увеличиваются озёра № 14 и 15 (площадь в августе 2021 г. – 10,8 и 11,7 тыс. м² соответственно), образовавшиеся в 2016 и 2018 гг. и находящиеся в контакте с ледником.

Далее рассмотрим результаты анализа разновременной аэрокосмической информации на участки озёр Подкова, Северное Чунгурчат и Балык Южное. Особое внимание уделим процессам формирования подземных каналов стока. Динамика крупных озёр Среднее Бирджалы и Восточное Бирджалы (№ 10, 11), прорывы которых происходили в 2006 и 2003 гг., подробно охарактеризована в работах [8, 16–18].

Динамика оз. Подкова и формирование подземного канала стока. В работах [16, 17] представлены схемы формирования оз. Подкова с 2002 г., когда восточнее ещё существовало до 2010 г. оз. Среднее Бирджалы (№ 11 на рис. 1). В работе [18] отмечен факт падения уровня воды в оз. Подкова и прекращения поверхностного

стока в 2013 г. Подробный анализ фотографий с вертолётных облётов и космических снимков позволил установить особенности и длительность процесса формирования подземного канала стока. На рис. 2 показано развитие оз. Подкова (№ 12 на рис. 1) с 2006 г., когда из двух озёр, связанных между собой протокой, образовалось одно подковообразное, до 29 октября 2020 г. Наибольшая площадь оз. Подкова зафиксирована в 2011 г. – 29,2 тыс. м² (см. рис. 1, б), наименьшая – на зимнем снимке 15.02.2014 г. и на осеннем снимке 29.10.2020 г. – 2,5 тыс. м² (см. рис. 2, в, и). Как отмечено в работе [24], такая площадь озера зимой и поздней осенью показывает наличие каналов фильтрации воды из озера, по которым вода продолжает стекать, когда притока воды в озеро уже нет. В сентябре 2014 г. (см. рис. 2, г) площадь озера составляла 17,6 тыс. м². Уменьшение площади по сравнению с 2011 г. произошло в результате заноса котловины в южной части отложениями флювиогляциальных потоков и частичного прорыва в 2013 г. На рис. 3 показаны результаты исследования последствий прорыва озера в 2013 г. на основе анализа фотографий с вертолётных облётов и данных наземного обследования в 2016 г.

22 августа 2013 г. во время вертолётного облёта было зафиксировано падение уровня воды в оз. Подкова и прекращение поверхностного стока из него (см. рис. 3, б) при продолжавшемся значительном притоке воды в озёрную котловину. Во время облёта 10 сентября на склоне и у подножия моренного вала, ограничивающего озеро с запада, были обнаружены свежие эрозионные размыты и конус выноса. При этом береговая линия озера оставалась такой же, как и 22 августа. Площадь озера в результате падения уровня воды уменьшилась на 8,3 тыс. м² (площадь озера, занесённая отложениями флювиогляциальных потоков, не учитывалась). Объём воды, вытекшей из озера и проникшей внутрь моренного вала, составил около 48,4 тыс. м³ (вычислен по величине падения уровня воды около 2 м – см. рис. 3, г – и средней площади между значениями до и после прорыва – 24,2 тыс. м²). Скорее всего, объём был больше, так как до момента выхода воды на поверхность на внешней стороне моренного вала вода продолжала поступать в озеро и проникать внутрь вала через образовавшийся входной портал. Если учесть, что

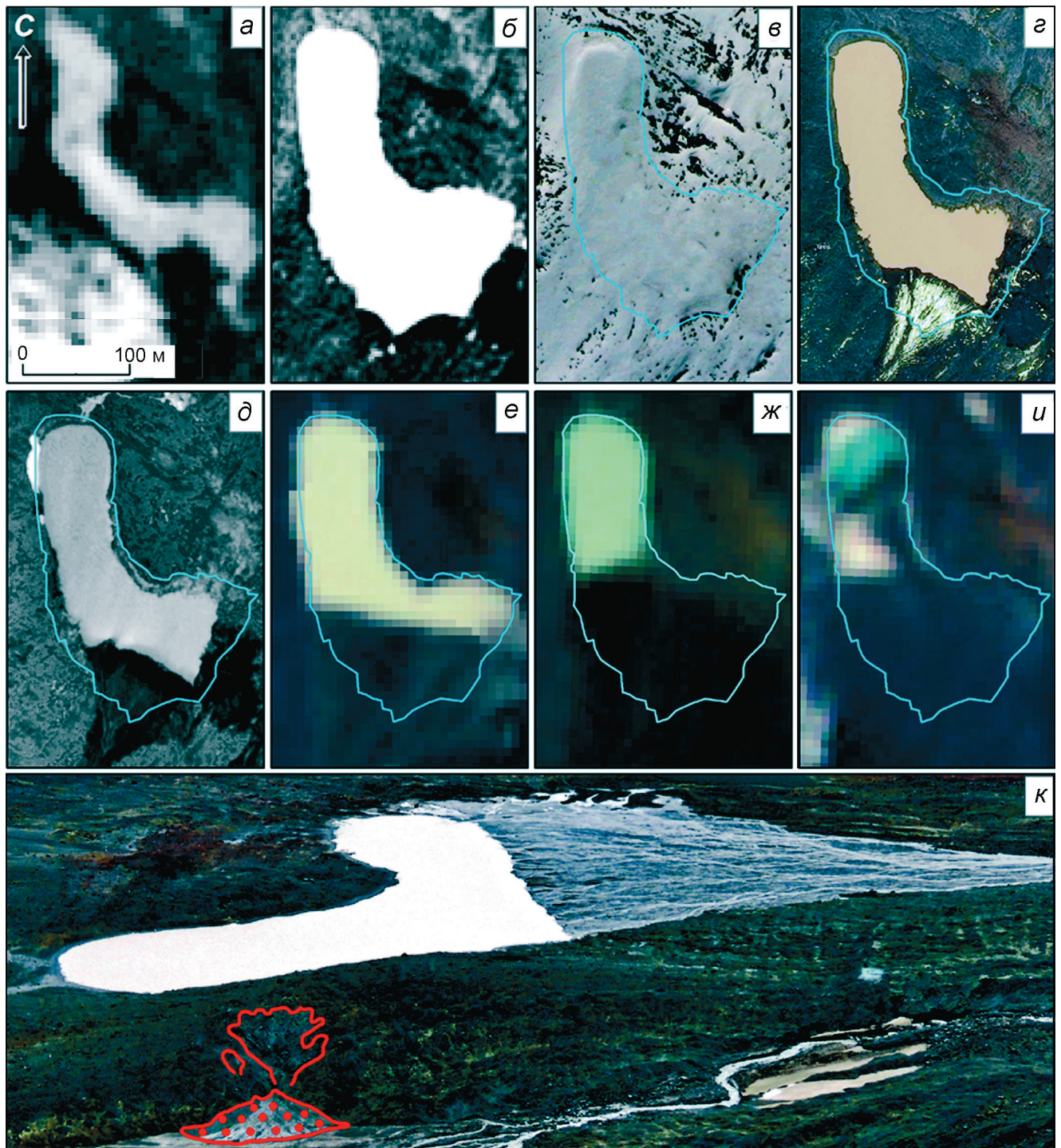


Рис. 2. Динамика озера Подкова.

Космоснимки: *а* – IRS-1C/1D 01.08.2006; *б* – SPOT 5 21.09.2011; *в* – Google Earth 15.02.2014; *г* – Yandex Maps 23.09.2014; *д* – Ресурс П 17.07.2016; *е* – Sentinel-2 24.07.2018; *ж* – Sentinel-2 23.06.2020; *з* – Sentinel-2 29.10.2020; *к* – вертолётный снимок М.Д. Докукина 10.07.2018 г. Красными контурами показаны эрозионно-оползневые ниши и селевые отложения, голубым контуром – границы озера 21.09.2011 г.

Fig. 2. Dynamics of Podkova Lake.

Space images: *a* – IRS-1C/1D 08/01/2006; *b* – SPOT 5 09/21/2011; *v* – Google Earth 02/15/2014; *g* – Yandex Maps 09/23/2014; *d* – Resource P 07/17/2016; *e* – Sentinel-2 07/24/2018; *zh* – Sentinel-2 06/23/2020, and Sentinel-2 10/29/2020; *u* – helicopter photo of M.D. Dokukin 10.07.2018. The red contours show erosion-landslide niches and mudflow deposits, the blue contour shows the lake boundaries on September 21, 2011

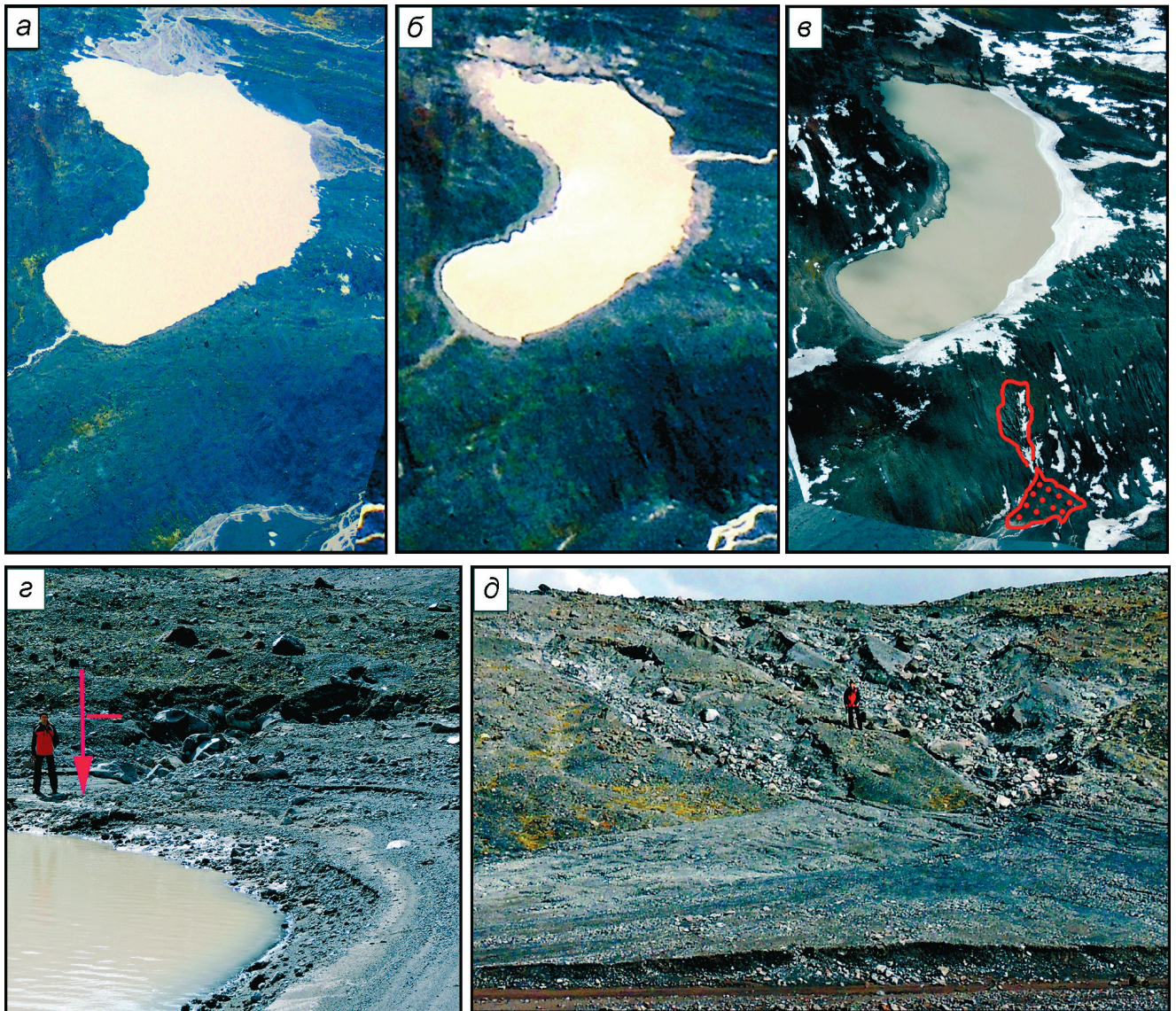


Рис. 3. Формирование подземного канала стока с озера Подкова.

Вертолётные снимки М.Д. Докукина: *а* – 01.08.2012 г.; *б* – 22.08.2013 г.; *в* – 10.09.2013 г. (красный контур – эрозионные размывы и отложения потоков из подземного канала стока); наземные фотографии М.Д. Докукина: *з* – 26.08.2016 г. (входной портал подземного канала стока, отметка на стрелке – уровень воды в озере до образования подземного канала); *д* – 26.08.2016 г. (участки выхода воды из подземного канала)

Fig. 3. Formation of an underground runoff channel from Podkova Lake.

Helicopter images of M.D. Dokukin: *a* – 08/01/2012; *b* – 08/22/2013; *v* – 09/10/2013 (red contour – erosive washouts and deposition of flows from the underground runoff channel); ground photographs of M.D. Dokukin: *z* – 08/26/2016 (entrance portal of the underground runoff channel, mark on the arrow – the water level in the lake before the formation of the underground channel); *d* – 08/26/2016 (sections of water outlet from the underground canal)

минимальное расстояние между входным и выходным порталами составляло около 70–80 м, можно сделать вывод, что сток воды шёл по нескольким подземным каналам при одном входном отверстии. Это подтверждается наличием серии рытвин на внешнем склоне моренного вала (см. рис. 3, *д*). Возможно также, что в мо-

ренном валу были и полости, которые заполнялись водой из озера перед тем, как она была сброшена через выходной портал.

У подножия вала образовался конус выноса площадью менее 1 тыс. м², сложенный в основном песчано-гравийным материалом. Так как на склоне в рытвинах в большом количестве

остался на месте и не был захвачен потоком глыбово-щебнистый материал, можно предполагать, что сечение подземных каналов стока воды из озера было небольшим, незначительными были и расходы сбрасываемой воды. Подземный канал стока оз. Подкова формировался около семи лет — с момента объединения небольших озёр, оставшихся от прорыва оз. Среднее Бирджалы в 2003 г. В дальнейшем режим стока воды из оз. Подкова по подземному каналу сохранялся, что показывают данные космоснимков: в июле 2016 г. площадь озера оставалась такой же, как и в 2014 г., отсутствовал и поверхностный сток из озера (см. рис. 2, д). В сентябре уровень воды в озере резко падал из-за уменьшения притока (данные космоснимков Sentinel-2). Аналогичная ситуация наблюдалась и в 2017 г., но в этот сезон был период резкого уменьшения площади озера в конце июля — начале августа. 8 августа 2017 г. уровень воды поднялся почти до отметок, какие были до прорыва в 2013 г. Это было связано с нестабильным режимом притока воды в озеро в результате развития гидрологической системы в массиве мёртвого льда у фронта ледника Бирджалычиран и изменения направления стока с него. В сентябре 2017 г. приток воды в озеро резко увеличился, одновременно возросло и поступление наносов. В результате на участке южного берега озера начал формироваться конус выноса. Этот процесс продолжился в 2018 г. (см. рис. 2, е, к), и к началу августа площадь озера уменьшилась до 8,3 тыс. м². Аналогичные размеры озера в летний период наблюдались в 2019–2021 гг., а площадь флювиального песчано-гравийного конуса выросла до 55 тыс. м² (по данным Sentinel-2). К концу октября ежегодно площадь озера уменьшалась до 2,5–3,0 тыс. м² (см. рис. 2, и).

Динамика оз. Северное Чунгурчат и его прорывы. На фрагментах аэрофотоснимков, представленных на рис. 4, показана динамика оз. Северное Чунгурчат и следы его прорывов с 1957 по 1987 г., а на вертолётных фотографиях — состояние котловины и русла ниже котловины в 1980 и 1981 гг. (см. рис. 4, ж, и). Для сравнения на всех фрагментах аэрофотоснимков показан контур озера с максимальной площадью в 1980 г. — 27,0 тыс. м². На аэрофотоснимке 1957 г. зафиксирован начальный этап формирования озера, когда его площадь составляла 7,8 тыс. м². Озеро

находилось на ледово-моренном массиве эллипсоидной формы с выраженным дугообразным фронтальным валом (уступом). Ледник к этому времени уже отступил от фронтального уступа на 750 м, протяжённость которого составляла более 100 м, а высота — около 30–40 м. Ниже уступа, почти вплотную к нему, находился ещё один вал, но к 1957 г. от него сохранилась одна лишь боковая дуга. Характер поверхности и динамика фронтального уступа указывают на значительную долю внутреннего льда, что позволило сформироваться подземному каналу стока воды из озера. Уровень воды в озере в 1970-х годах не был максимальным, а был несколько ниже, чем в 1957 г., что вместе со значительными изменениями в русле ниже уступа и на самом уступе свидетельствует о развитии подземного канала стока. К 1974 г. площадь озера увеличилась до 17,5 тыс. м² за счёт таяния мёртвых льдов, слагающих внутреннюю часть массива котловины.

На снимке 1974 г. (см. рис. 4, б) видны чёткие следы размывов, начинающиеся у подножия уступа. Они имеют вид широкой (до 48 м) поймы с обрывистыми невысокими берегами. Причиной формирования эрозионной поймы мог быть только прорыв оз. Северное Чунгурчат по подземному каналу, так как следы мощного водного потока начинаются у подножия плотины озера, а проран на теле плотины отсутствует. По сообщению местного чабана, в 1973 г. в районе минеральных источников проходил селевый поток, который, возможно, и был следствием прорыва озера. В августе 1980 г. зафиксирован подъём уровня воды в озере, вероятно, в результате блокирования подземного канала стока. Вода стала стекать из северо-восточной части озера по ложбине, между фронтальным уступом и склоном, что видно на фотографии, сделанной с вертолёта (см. рис. 4, ж). На аэрофотоснимке 1982 г. (точная дата неизвестна) видны следы прорыва озера, который произошёл в результате обрушения (оползания) блока морены в озеро в северо-восточной части (см. рис. 4, д). Ширина ниши отрыва оползня — 30 м. На аэрофотоснимке 1987 г. (см. рис. 4, е) озеро отсутствует и видны следы сброса воды из него с захватом значительной массы обломочного материала фронтального уступа (объёмом около 20–30 тыс. м³) с шириной эрозионно-оползневой ниши около 90 м. Ниже фронтального усту-

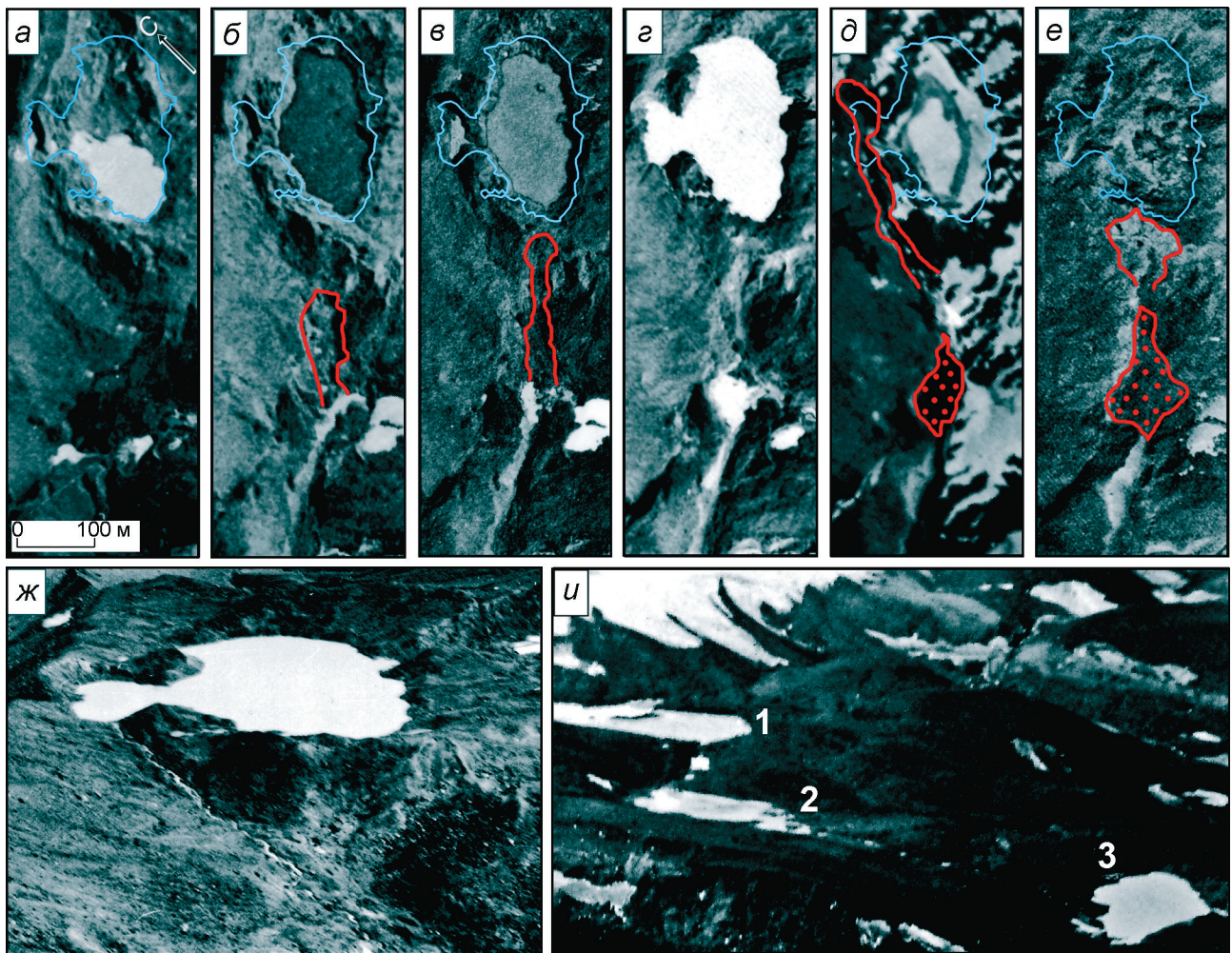


Рис. 4. Динамика озера Северное Чунгурчат.

Аэрофотоснимки: *а* – 22.08.1957 г.; *б* – 23.07.1974 г.; *в* – 09.08.1978 г.; *г* – 22.08.1980 г.; *д* – 1982 г.; *е* – 28.09.1987 г.; вертолётные фотографии: *ж* – Ю.Г. Ильичёва, 1980 г.; *и* – И.Б. Сейновой, 1981 г. (цифрами обозначены номера озёр на рис. 1). Красными линиями и контурами показаны эрозионные размывы (эрозионно-оползневые ниши) и селевые отложения, голубым контуром – границы озера 22.08.1980 г.

Fig. 4. Dynamics of Northern Chungurchat Lake.

Aerial photographs: *a* – 08/22/1957; *б* – 07/23/1974; *в* – 08/09/1978; *г* – 08/22/1980; *д* – 1982; *е* – 09/28/1987; helicopter photos: *ж* – Yu.G. Plyichev, 1980; *и* – I.B. Seinova, 1981 (the numbers show the numbers of the lakes in Fig. 1). Red lines and contours show erosive washouts (erosion-landslide niches) and debris flow deposits, blue contour – the boundaries of the lake on August 22, 1980

па образовался конус выноса селевых отложений площадью 10,5 тыс. м².

Анализ аэрофотоснимков показывает, что в 1970-х годах в русле ниже уступа практически отсутствовали отложения паводков и селевых потоков. Рыхлообломочные конусы выноса образовались в 1980-х годах, что можно объяснить постепенным уменьшением содержания льда в составе массива вала (уступа). В первые годы формирования подземные каналы прокладывались в ледяных линзах и прослоях. Постепенное вытаивание льда приводило к тому, что вода,

находя себе новые пути, проникала в рыхлообломочную толщу, обходя её. Последующие прорывы озёр сопровождались оползаниями увлажнённого грунта и отложением его в виде конусов на дне долины ниже уступа. При этом бровка уступа сохранилась как плотина озера, что указывает на подземные прорывы.

В работе [25] приводятся данные о сходах селей по р. Бирджалысу в 1983 и 1987 гг. На фрагменте аэрофотоснимка 1987 г. (см. рис. 4, *е*) следы прорыва и селевые отложения недостаточно чёткие, чтобы можно было считать датой про-

рыва 1987 г. Следовательно, подземный прорыв оз. Северное Чунгурчат мог быть причиной селя 1983 г. Начиная с 1987 г., на последующих снимках оз. Северное Чунгурчат отсутствует. Это, скорее всего, связано с прекращением поступления в котловину потоков воды с ледника после ухода его с возвышенного массива голоценового лавового потока. Существование бывшего канала притока воды в озеро с ледника хорошо видно на вертолётном снимке И.Б. Сейновой 1981 г. (см. рис. 4, и) по цепочке озёр: 1 – Северное Чунгурчат, 2 – Среднее Чунгурчат, 3 – Южное Чунгурчат (номера соответствуют схеме на рис. 1).

Динамика оз. Южное Чунгурчат и его прорыв. Оз. Южное Чунгурчат (№ 3 на рис. 1) формировалось на месте массива слившихся гряд срединных морен и основного языка ледника Чунгурчат в период 1974–1987 гг. Оно быстро заполнило понижение в рельефе поверхности лавового потока после отступления ледника и постепенно увеличивалось к югу за счёт таяния ледяных гряд. С 1980 по 1987 г. граница массива срединных гряд отступила на 160 м и площадь оз. Южное Чунгурчат достигла максимума – 35,7 тыс. м². В 1988 г. поверхность этого массива была выше уровня озера (данные вертолётного облёта). При этом уровень озера не поднимался, а перелива воды не было, так как в северном направлении из него был постоянный поверхностный сток, что видно на фотографии 1981 г. (см. рис. 4, и).

Перелив воды из озера по поверхности массива срединных морен начался в тот момент, когда в результате таяния льда поверхность массива стала ниже, чем участок истока воды из озера в северной его части. По данным космоснимков Landsat-5 это произошло в 1993 г. (на снимках 15 июля и 1 сентября 1993 г. существовало небольшое остаточное озеро), когда по р. Бирджалы-Су был зафиксирован сход селя [9, 11, 25]. Сравнение аэрофотоснимков 1987 и 1997 гг. показало, что вода устремилась в понижение между массивом срединных морен и склоном. Несмотря на то, что уклон русла ниже озера был невелик (0,10–0,11), ниже в главном русле р. Бирджалы-Су заметны изменения, что говорит об эрозионной деятельности потока (прорывного паводка).

В последующие годы в котловине оз. Южное Чунгурчат ежегодно весной и в начале лета образуются озера за счёт таяния снега и мёртво-

го льда. Его максимальная площадь составляет 8,1 тыс. м². В конце лета и осенью озеро прекращает существование в результате того, что фильтрационный сток в дно котловины превышает приток в него, как это обычно происходит у озёр с наличием подземного канала стока [24].

Динамика оз. Балык Южное и его подземные прорывы. Оз. Балык Южное (№ 19 на рис. 1) расположено в левой части тыловой зоны каменного глетчера, который выходит из цирка под горой Балыксубаши высотой 3932 м. Оно существовало до 1957 г. и по данным аэрофотоснимков имело площадь около 2,0–2,2 тыс. м² (рис. 5, д, е). Ниже оз. Балык Южное на боковом уступе каменного глетчера на аэрофотоснимках 1978 г. и вертолётном снимке 1988 г. обнаружены следы оползаний и селевых потоков, аккумуляция материала которых произошла у подножия уступа на площади до 12 тыс. м² (см. рис. 5, б, з). Ниже этого конуса в русле р. Кара-Кая-Су селепроявлений не зафиксировано. Таким образом, по долине селевой поток не проходил. Эти явления можно интерпретировать как следствие процесса формирования подземного канала стока из озера. Обычные оползни на откосах без участия водных потоков не формируют таких масштабных конусов выноса. В последующие годы значительных изменений на уступе каменного глетчера не происходило (см. рис. 5, в). Это указывает на то, что подземный канал стока из озера сформировался и сопутствующих данному процессу явлений в дальнейшем не было.

На аэрофотоснимке 1997 г. светлая кайма у границ оз. Балык Южное показывает, что в 1987–1997 гг. его площадь достигала больших размеров (см. рис. 5, е). В результате просмотра космоснимков Sentinel-2 за период 2015–2021 гг. выявлена особенность динамики оз. Балык Южное – максимальные площади озера (до 3,7–4,0 тыс. м²) летом и постепенное исчезновение озера во второй половине сентября – октябре. В некоторые годы максимум площади озера наблюдался в середине сентября (см. рис. 5, ж).

В работе [26] отмечено, что подземные каналы стока в массивах каменных глетчеров могут достигать длины 1,5 км, а в результате прорывов озёр по подземным каналам в каменных глетчерах сходили катастрофические сели. В случае оз. Балык Южное длина подземного канала составляет 160 м. Канал образовался не по оси ка-

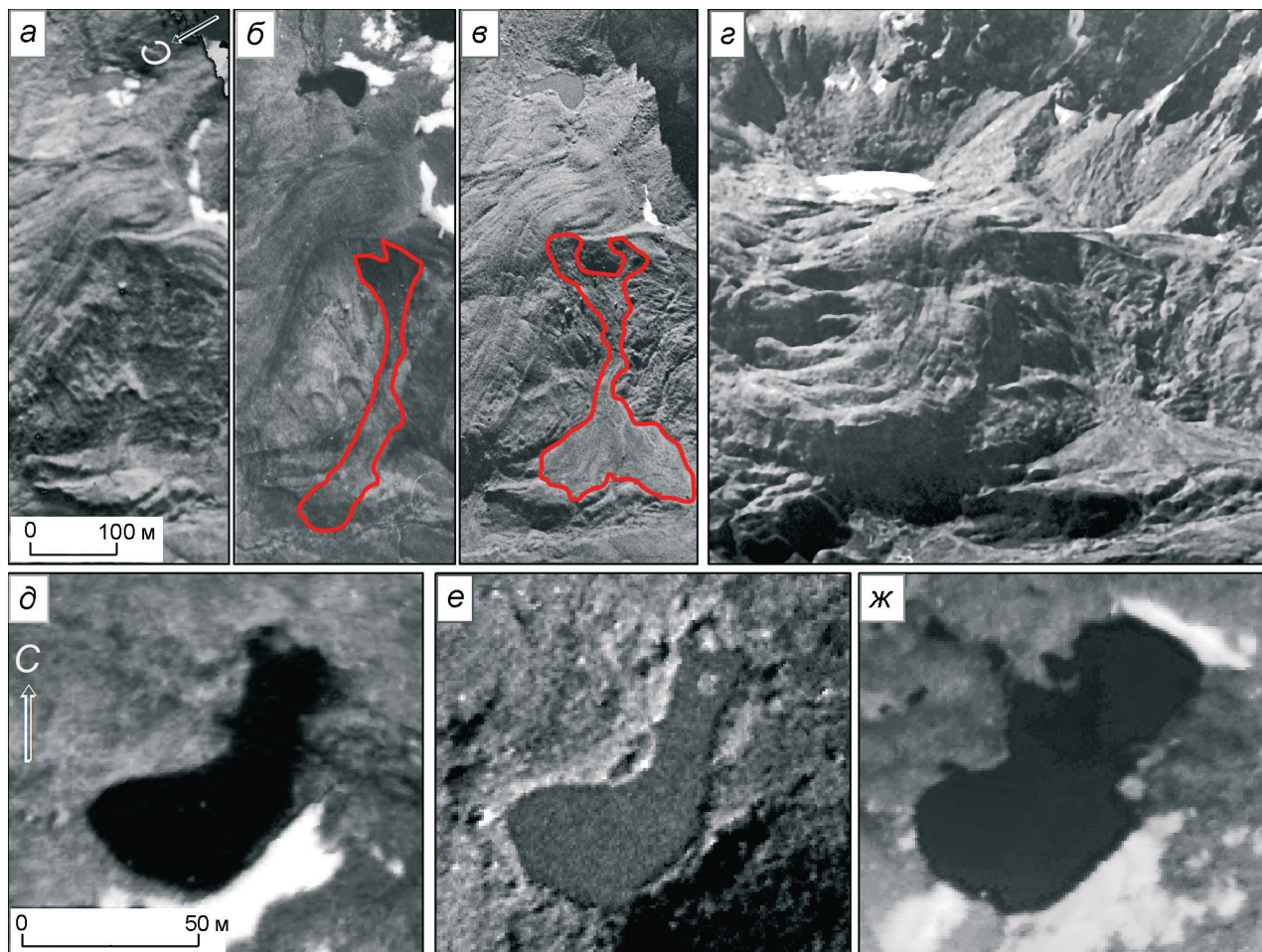


Рис. 5. Озеро Балык Южное и его подземные прорывы:

а – аэрофотоснимок 22.08.1957 г.; *б* – аэрофотоснимок 09.08.1978 г.; *в* – аэрофотоснимок 1997 г.; *г* – вертолётный снимок М.Д. Докукина, 1988 г.; *д* – аэрофотоснимок 09.08.1978 г.; *е* – аэрофотоснимок 1997 г.; *ж* – космоснимок Канопус В4 от 14.09.2020 г. Красные контуры – участки оползания на уступе каменного глетчера и селевых отложений

Fig. 5. Balyk South Lake and its underground breakthroughs:

a – aerial photograph of 08/22/1957; *b* – aerial photograph of 08/09/1978; *v* – aerial photograph of 1997; *г* – helicopter photograph of M.D. Dokukin, 1988; *d* – aerial photograph of 08/09/1978; *e* – aerial photograph of 1997; *ж* – satellite image of Kano-pus V4 dated September 14, 2020. Red outlines – areas of landslide on the rock glacier ledge and debris flows

менного глетчера, где наблюдается медленное его движение, а в боковом направлении – через стабильную часть каменного глетчера, что обусловило стабильный режим озера в течение последних двух десятилетий.

Обсуждение результатов и выводы

В результате анализа разновременной аэрокосмической и картографической информации, а также полевых наблюдений получены данные о динамике ледниковых озёр, образовавшихся в ходе отступления ледника Джикиуганкез. Боль-

шое число сформировавшихся озёр обусловлено тем, что ледник ранее покрывал поверхность голоценового лавового потока, в рельефе которого было много поперечных валов и углублений между ними. Отступая, язык ледника разделялся на несколько ответвлений и перекрывал выход воды из углублений (котловин) как самим телом, так и оставшимися ледяными грядами срединных морен. В этих углублениях возникали озёра, подпруженные ледяными и ледово-каменными плотинами, что способствовало дальнейшей деградации плотин и прорывам озёр.

Основным механизмом прорывов озёр, особенно крупных (№ 10, 11 на рис. 1), был пере-

лив через ледяную грядку с её размывом. Всего таких прорывов озёр было четыре (1993 г. — Южное Чунгурчат, 1999 г. — Аристова, 2003 г. — Среднее Бирджалы, 2006 г. — Восточное Бирджалы). Практически во всех случаях были паводки и селевые потоки. При таком механизме есть возможность спрогнозировать прорыв, что и было сделано для оз. Восточное Бирджалы в 2006 г. [8]. Кроме прорывов озёр переливом через ледяную грядку возможны и подлёдные прорывы. Такой вывод был сделан по прорыву оз. Северное Бирджалы 1, так как на аэрофотоснимках 1974 г. озера уже не было, а приток воды в котловину происходил, но целостность ледяной гряды, ограничивающей озеро с востока, не была нарушена.

Сложнее одновременно определить место и время подземного прорыва озера, так как подземный канал формируется незаметно. Поэтому очень важно отслеживать эволюцию озёр, испытавших такие прорывы, с момента их формирования. Кроме того, следует учитывать, что объём сбрасываемой из озера воды при подземном прорыве может быть меньше, чем объём воды, аккумулированной в полостях моренного вала или массива, ограничивающего озеро. В связи с этим необходимо наблюдать за состоянием плотины озера и изучать её состав (примерное количество льда), поскольку от этого зависит расход селевого или паводочного потока при прорыве. Подземный прорыв по образовавшемуся каналу в теле линзы льда приведёт к сбросу водной массы почти без твёрдой составляющей, как это происходило в 1970-х годах на участке плотины оз. Северное Чунгурчат. Если же вода фильтруется из озера в тело плотины, то происходит обводнение больших объёмов грунта и при прорыве озера формируется грязекаменный селевой поток, как это было в случае оз. Северное Чунгурчат предположительно в 1983 г. Подобные процессы происходят при прорывах озёр по подземным каналам в каменных глетчерах, где потоком с озера захватывается значительный объём грунта фронтального уступа. В этих случаях опасны даже незначительные по объёму озёра, подобные оз. Балык Южное площадью до 4 тыс. м². При блокировке подземного канала стока площадь таких озёр может многократно увеличиваться. Прорывом озера в верховьях р. Каргалинка был вызван катастрофический се-

левой поток в 2015 г., принёсший разрушения в г. Алматы. До и после прорыва озеро имело площадь менее 4 тыс. м² (по данным космоснимков Google Earth 2012 и 2016 гг.), а в момент прорыва — 77,2 тыс. м² [26].

Пример оз. Подкова показывает, что подземный канал стока в массиве моренного вала может формироваться довольно быстро (около семи лет после образования озера), а в итоге не привести к сходу значительного селевого потока. Возможно, это связано с тем, что внешний склон моренного вала был более плотным, чем внутренний, обращённый к озеру. Кроме рассмотренных механизмов зафиксирован и механизм прорыва в результате сползания (обрушения) моренных масс в озеро, как это было на оз. Северное Чунгурчат (см. рис. 4, д). Подобный прорыв озера в результате схода оползня произошёл в 2020 г. в Тибете [2].

В процессе эволюции ледниковых озёр у ледника Джикиуганкез иногда резко менялся их гидрологический режим в результате перестраивания направления потоков талых ледниковых вод. После прорыва оз. Восточное Бирджалы в 2006 г. сток с ледника Бирджалычиран перестал поступать в оз. Северное Бирджалы 2, и оно из-за малой площади водосбора перестало быть прорывоопасным, хотя имеет максимальную из всех озёр у ледника Джикиуганкез площадь. Динамика оз. Северное Бирджалы 2 в настоящее время в основном зависит от объёма снежников, накопившихся за зиму. Площадь озера в 2021 г. по сравнению с 2020 г. увеличивалась на фоне трёхкратного превышения площади метелевых снежников в котловине во второй половине июня. В 2017 г. резко вырос приток воды в оз. Подкова в результате изменения направления потока талых вод с ледника, что привело к быстрому заносу котловины озера флювиогляциальными отложениями и уменьшению площади озера. Прекращение притока воды с ледника привело к исчезновению озёр Северное и Среднее Чунгурчат.

В последние годы появились новые озёра: № 14 — Юго-Западное Бирджалы и № 15 — Южное Бирджалы. Последнее озеро имеет потенциал прорыва, так как оно подпружено ледником и, возможно, будет увеличиваться в размерах. По данным [27], на участке существующего языка ледника Чунгурчатчиран (Джики-

уганкез) в коренном ложе обнаружены участки переуглублений, на которых возможно формирование крупных озёр в массивах мёртвых льдов с максимальной глубиной до 40 м. В связи с тем, что последствия от прорывов крупных озёр могут наблюдаться на расстоянии более 40 км ниже по течению от источника, мы продолжим дальнейшие исследования озёр в этом районе.

Благодарности. Работа выполнена по Плану научно-исследовательских и технологических работ научно-исследовательских учреждений Росгидромета в рамках темы 6.3.2 АААА-А20-120031990040-7 и Государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова по теме 1.7 «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4). Авторы выражают благодарность Главному управлению МЧС России по Кабардино-Балкарской Республике за предоставление вертолёта для проведения аэровизуальных обследований и проведения экспедиции в 2016 г., ГК «СКАНЭКС» за предоставление космоснимков, Научно-исследовательскому центру космической гидрометеорологии «Планета» за предоставление космоснимков, Ю.Г. Ильичёву

и И.Б. Сейновой за предоставление фотографий с вертолётных облётов в 1980 и 1981 гг. Авторы благодарны А.С. Борониной и анонимному рецензенту за критические комментарии и ценные замечания, сделанные в процессе подготовки статьи.

Acknowledgments. The work was carried out according to the Plan of research and technological work of Roshydromet research institutions within the framework of topic 6.3.2 АААА-А20-120031990040-7 and the state assignment of the Lomonosov Moscow State University on topic 1.7 «Danger and risk of natural processes and phenomena» (121051300175-4). The authors express their gratitude to the Main Directorate of the EMERCOM of Russia in the Kabardino-Balkarian Republic for providing a helicopter for conducting aerovisual surveys and conducting an expedition in 2016, SCANEX Group for providing space images, Research Center of Space Hydrometeorology Planeta for providing space images, Yu.G. Ilyichev and I.B. Seinova for providing photographs from helicopter flights in 1980 and 1981. The authors are grateful to A.S. Boronina and anonymous referee for critical comments and valuable remarks made during the preparation of the article.

Литература

1. *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. V. 18. P. 813–827. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-813-2018>.
2. *Zheng G., Mergili M., Emmer A., Allen S., Bao A., Guo H., Stoffel M.* The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment // *The Cryosphere.* 2021. V. 15. Is. 7. P. 3159–3180. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3159-2021>.
3. *Vilca O., Mergili M., Emmer A., Frey H., Huggel C.* The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Peru) // *Landslides.* 2021. V. 18. P. 2211–2223. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01670-0>.
4. *Mergili M., Pudasaini S.P., Emmer A., Fischer J.-T., Cochachin A., Frey H.* Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru) // *Hydrol. Earth Syst.* 2020. V. 24. P. 93–114. <https://doi.org/10.5194/hess-24-93-2020>.
5. *Allen S.K., Rastner P., Arora M., Huggel C., Stoffel M.* Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition // *Landslides.* 2016. V. 13. P. 1479–1491. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0584-3>.

References

1. *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, 18: 813–827. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-813-2018>.
2. *Zheng G., Mergili M., Emmer A., Allen S., Bao A., Guo H., Stoffel M.* The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment. *The Cryosphere.* 2021, 15 (7): 3159–3180. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3159-2021>.
3. *Vilca O., Mergili M., Emmer A., Frey H., Huggel C.* The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Peru). *Landslides.* 2021, 18: 2211–2223. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01670-0>.
4. *Mergili M., Pudasaini S.P., Emmer A., Fischer J.-T., Cochachin A., Frey H.* Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru). *Hydrol. Earth Syst.* 2020, 24: 93–114. <https://doi.org/10.5194/hess-24-93-2020>.
5. *Allen S.K., Rastner P., Arora M., Huggel C., Stoffel M.* Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition. *Landslides.* 2016, 13: 1479–1491. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0584-3>.
6. *Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Alejnikov A.A., Bekkiev M.Yu., Viskhadzheva K.S., Dokukin M.D., Kalov R.KH., Kidyayeva V.M., Krylenko V.V., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Rets E.P., Savernyuk E.A., Smirnov A.M.* The outburst of

6. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 70–80. [http://dx.doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(70-80\)](http://dx.doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(70-80)).
7. Герасимов А. О прорыве ледникового озера на NO склоне Эльбруса // Изв. Геологич. Комитета. 1909. Т. 28. № 7. С. 156–160.
8. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Сейнова И.Б., Крыленко И.В. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса 11 августа 2006 года: прогноз, события и последствия // МГИ. 2007. Вып. 102. С. 225–229.
9. Ефремов Ю.В., Ильичёв Ю.Г., Николайчук А.В. Динамика современного оледенения и селевых процессов на северных склонах г. Эльбрус в истоках Малки // Тр. Всерос. конф. по селям. 26–28 октября 2005 г. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. С. 210–220.
10. Черноморец С.С., Тутубалина О.В. Селеопасные ледниковые озёра как фактор угрозы при строительстве (на примере Северного Приэльбрусья) // Тр. Всерос. конф. по селям. 26–28 октября 2005 г. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. С. 202–207.
11. Хаджиев М.М. Селевая опасность в верховьях бассейна р. Малки (Жылысу) // Тр. Всерос. конф. по селям. 26–28 октября 2005 г. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. С. 368–373.
12. Черноморец С.С., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Шахмина М.С., Эванс С.Дж. Ледниковые озера на Кавказе: опасность прорывов и опыт прогноза // Снежные лавины, сели и оценка риска. 2009. Вып. 2. С. 84–94.
13. Запорожченко Э.В. Селевые потоки по рр. Кара-Кая-Су и Бирджалы-Су в Кабардино-Балкарской Республике: сравнительный анализ прошлой и новейшей истории // Вестн. Владикавказского науч. центра. 2008. Т. 8. № 2. С. 27–33.
14. Кидяева В.М., Крыленко И.Н., Крыленко И.В., Петраков Д.А., Черноморец С.С. Колебания уровня воды в горных ледниковых озёрах Приэльбрусья // ГеоРиск. 2013. № 3. С. 20–27.
15. Кидяева В.М. Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озёр. Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2014. 239 с.
16. Багов Аз.М., Докукин М.Д., Савернюк Е.А. Особенности деградации ледников Бирджалычиран и Чунгурчатчиран северо-восточного подножия Эльбруса и эволюция приледниковых озёр за 50 лет // Материалы междунар. науч. конф. «Гляциология в начале XXI века». Москва, 15–16 октября 2009 г. М.: Университетская книга, 2009. С. 156–161.
17. Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Багов А.М., Маркина А.В. О перестройке гидрографической сети се-
Bashkara glacier lake (Central Caucasus, Russia) on September 1, 2017. *Earth's Cryosphere*. 2018, 2 (22): 61–70. doi: 10.21782/EC2541-9994-2018-2(61-70).
7. Gerasimov A. On the breakthrough of a glacial lake on the NO slope of Elbrus. *Izv. Geologich. Komiteta. Proc. of the Geological Committee*. 1909, 28 (7): 156–160. [In Russian].
8. Chernomorets S.S., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Sejnova I.B., Krylenko I.V. 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, 102: 225–229. [In Russian].
9. Efremov Yu.V., Il'ichev Yu.G., Nikolaichuk A.V. Dynamics of modern glaciation and mudflow processes on the northern slopes of Elbrus in the headwaters of Malka. *Trudy Vserossiiskoi konferentsii po selyam. 26–28 oktyabrya 2005 g. Proc. of the All-Russian conf. on mudflows. October 26–28, 2005*. Moscow: LKI Publishing House, 2007: 210–220. [In Russian].
10. Chernomorets S.S., Tutubalina O.V. Mudflow hazardous glacial lakes as a threat factor during construction (on the example of the Northern Elbrus region). *Trudy Vserossiiskoi konferentsii po selyam. 26–28 oktyabrya 2005 g. Proc. of the All-Russian conf. on mudflows. October 26–28, 2005*. Moscow: LKI Publishing House, 2007: 202–207. [In Russian].
11. Khadzhiyev M.M. Mudflow hazard in the upper reaches of the Malka River (Zhylysu). *Trudy Vserossiiskoi konferentsii po selyam. 26–28 oktyabrya 2005 g. Proc. of the All-Russian conf. on mudflows. October 26–28, 2005*. Moscow: LKI Publishing House, 2007: 368–373. [In Russian].
12. Chernomorets S.S., Krylenko I.V., Krylenko I.N., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Shakhmina M.S., Evans S.G. Glacial lakes in the Caucasus: the danger of outbursts and the experience of forecasting. *Snezhnye laviny, seli i otsenka riska. Snow avalanches, mudflows, and risk assessment*. 2009, 2: 84–94. [In Russian].
13. Zaporozhchenko E.V. Mudflows along the Kara-Kaya-Su and Birjaly-Su rivers in the Kabardino-Balkarian Republic: a comparative analysis of past and recent history. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*. 2008, 8 (2): 27–33. [In Russian].
14. Kidyayeva V.M., Krylenko I.N., Krylenko I.V., Petrakov D.A., Chernomorets S.S. Fluctuations in the water level in mountain glacial lakes in the Elbrus region. *GeoRisk*. 2013, 3: 20–27. [In Russian].
15. Kidyayeva V.M. Assessment of the potential hazard in case of outburst of mountain lakes. *Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata geograficheskikh nauk*. Degree thesis. Moscow: MSU, 2014: 239 p. [In Russian].
16. Bagov Az.M., Dokukin M.D., Savernyuk E.A. Features of degradation of the Birdzhalychiran and Chungurchatchiran glaciers of the northeastern foot of Elbrus and the evolution of periglacial lakes over 50 years. *Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Glyatsiologiya v nachale XXI veka»*. Moskva, 15–16 oktyabrya 2009 g. Materials of the intern. scientific conf. «Glaciology at the beginning of the XXI century». Moscow, October 15–16, 2009. Moscow: University book, 2009: 156–161. [In Russian].
17. Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bagov A.M., Markina A.V. Reconstruction of the hydrographic network

- веро-восточного подножия Эльбруса (бассейны рек Бирджалы-Су и Кара-Кая-Су) // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 23–30.
18. Докукин М.Д. Современная динамика (2011–2013 гг.) озёрно-ледникового комплекса северо-восточного подножия Эльбруса (результаты аэрокосмического мониторинга) // Материалы I Междунар. науч. конф. «Развитие регионов в XXI веке». Часть I. 31 октября – 2 ноября 2013 г. Владикавказ: ИПЦ СОГУ, 2013. С. 190–195.
 19. Калов Х.М., Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Атакуев Ж.К., Хаткутов А.В. Комплексный мониторинг динамики ледников Эльбруса // Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели. Материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. 75-летию председателя ФГБНУ «Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук», д-ра техн. наук, профессора П.М. Иванова. Нальчик: 2017. С. 156–159.
 20. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.А., Рототаева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М. Современные изменения ледников горных районов России. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2015. 288 с.
 21. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 // *Frontiers in Earth Science*, 2019. V. 7. Article 153. P. 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153>.
 22. Беккиев М.Ю., Докукин М.Д., Калов Р.Х., Ташилова А.А. Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021. Т. 8. № 3. С. 113–141. doi: 10.21513/2410-8758-2021-3-113-141.
 23. Каталог ледников СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Ч. 5. Бассейны рек Малки. Баксана. Л.: Гидрометеоздат, 1970. 146 с.
 24. Докукин М.Д., Шагин С.И. Особенности динамики ледниковых озёр с подземными каналами стока (анализ разновременной аэрокосмической информации) // *Криосфера Земли*. 2014. Т. XVIII. № 2. С. 47–56.
 25. Богаченко Е.М., Ильичёв Ю.И., Зимницкий А.В. Исследование гляциальных озёр Приэльбрусья на предмет их потенциальной селевой опасности // *Тр. Всерос. конф. по селям 26–28 октября 2005 г.* М.: Изд-во ЛКИ, 2007. С. 175–181.
 26. Докукин М.Д., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Савернюк Е.А., Черноморец С.С. Каменные глетчеры – очаги формирования катастрофических селей // *ГеоРиск*. 2020. Т. XIV. № 2. С. 52–65. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-52-65>.
 27. Лаврентьев И.И., Петраков Д.А., Кутузов С.С., Коваленко Н.В., Смирнов А.М. Оценка потенциала развития ледниковых озёр на Центральном Кавказе // *Лёд и Снег*. 2020. Т. 60. № 3. С. 343–360. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030044>.
 - of the northeastern foot of Elbrus (basins of the Birjalı-Su and Kara-Kaya-Su rivers). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 2 (118): 23–30. [In Russian].
 18. Dokukin M.D. Modern dynamics (2011–2013) of the glacial-lake complex of the northeastern foot of Elbrus (results of aerospace monitoring). *Materialy Pervoi Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Razvitie regionov v XXI veke»*. Chast' I. 31 oktyabrya – 2 noyabrya 2013 g. Materials of the I Intern. Scientific Conf. «Development of Regions in the XXI Century». Part I. October 31 – November 2, 2013. Vladikavkaz: IPC SOGU, 2013: 190–195. [In Russian].
 19. Kalov KH.M., Bekkiev M.Yu., Dokukin M.D., Kalov R.KH., Atakuev ZH.K., Khatkutov A.V. Complex monitoring of the dynamics of the Elbrus glaciers. *Ustoichivoe razvitie: problemy, kontseptsii, modeli. Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 75-letiyu predsedatelya FGBNU professora P.M. Ivanova. Sustainable development: problems, concepts, models*. Materials of the All-Russian conf. with intern.l participation dedicated to the 75th anniversary of the chairman of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Professor P.M. Ivanov. Nalchik: Publishing House KBSC RAS, 2017: 156–159. [In Russian].
 20. Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Murav'ev A.Ya., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M. *Sovremennye izmeneniya lednikov gornykh raionov Rossii*. Recent glacier changes in mountain regions of Russia. Moscow: KMK Scientific Press, 2015: 288 p. [In Russian].
 21. Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7 (153): 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153>.
 22. 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, 8 (3): 113–141. [In Russian]. Doi: 10.21513/2410-8758-2021-3-113-141.
 23. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 8. Pt. 5. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 146 p. [In Russian].
 24. Dokukin M.D., Shagin S.I. The specific features of the behavior of glacial lakes with underground drain channels (analysis of multi temporal aerospace information). *Earth's cryosphere*. 2014, XVIII (2): 41–50.
 25. Bogachenko E.M., Ilichev Yu.I., Zimnitskii A.V. Study of glacial lakes in the Elbrus region for their potential mudflow hazard. *Trudy Vserossiiskoi konferentsii po selyam: 26–28 oktyabrya 2005 g.* Proc. of the All-Russian conf. on mudflows: October 26–28, 2005. Moscow: LKI Publishing House, 2007: 175–181. [In Russian].
 26. Dokukin M.D., Bekkiev M.Yu., Kalov R.KH., Savernyuk E.A., Chernomoretz S.S. Rock glaciers as origination sites of the catastrophic debris flows. *GeoRisk*. *GeoRisk World*. 2020, XIV (2): 52–65. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-2-52-65>. [In Russian].
 27. Lavrentiev I.I., Petrakov D.A., Kutuzov S.S., Kovalenko N.V., Smirnov A.M. Assessment of glacier lakes development potential in the Central Caucasus. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (3): 343–360. <https://doi.org/10.31857/S2076673420030044> [In Russian].