УДК 551.324.63 doi:10.15356/2076-6734-2017-1-10-24

О наступании ледников в условиях вулканической деятельности вулкана Ключевской (Камчатка)

© 2017 г. М.Д. Докукин[1*], И.Б. Сейнова[2], Е.А. Савернюк[2], С.С. Черноморец[2]

[1*]Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия;
[2]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[*]inrush@bk.ru

On advancing of glaciers due to activity of the Klyuchevskaya Sopka volcano (Kamchatka)

M.D. Dokukin[1*], I.B. Seynova[2], E.A. Savernyuk[2], S.S. Chernomorets[2]

[1*]High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia; [2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[*]inrush@bk.ru

Received April 15, 2016 *Accepted June 2, 2016*

Keywords: ***Erman Glacier, glacier advance, Klyuchevskaya volcano, lateral eruption, space images, volcanic and rock avalanche deposits, «wandering glaciers».***

Summary

New data on continuing advance of the Kamchatka glaciers Erman, Vlodavets, Sopochny, Schmidt, and Bogdanovich were obtained as a result of analysis of aerospace information taken at different times. Glacier Erman advances during the past 70 years (1945–2016). Over the period from 1949 to 2016, its area increased by 4.7 km^2 and the length – by 3.3 km (from 18.2 to 21.5 km). The highest speed of advancing had been estimated for the Schmidt glacier, in 2007–2013 it exceeded 100 m/year. We had identified a new isolated glacier between glaciers Erman and Schmidt, named as the Obvalny (the «Avalanche») glacier, since in 1945 this glacier was buried under volcanic-avalanche deposits resulted from the Klyuchevskaya volcano eruption. In 1975–2016, the Obvalny glacier advanced over a distance of about 1700 m. Also, we had found more 30 ice-rock massifs («wandering glaciers») on slopes of the Klyuchevskaya volcano. Their contours looked like drops or tongues, and some of them advanced in the frontal zone. From 2002 to 2016, the «wandering glacier» in the upper reaches of river Glubokaya (eastern sector of the volcano) advanced for 740 m (55 m/year). Advancing of glaciers here is a consequence of lateral and terminal eruptions of the Klyuchevskaya volcano in XX and XXI centuries.

Поступила 15 апреля 2016 г. *Принята к печати 2 июня 2016 г.*

Ключевые слова: ***«блуждающие ледники», вулкан Ключевской, вулканогенно-обвальные отложения, латеральное извержение, ледник Эрмана, космические снимки, наступание ледников.***

На основе анализа разновременной аэрокосмической информации за период 1949–2016 гг. получены новые данные о современном состоянии и наступании ледников района вулкана Ключевской – Эрмана, Влодавца, Сопочного, Шмидта, Богдановича и безымянных «блуждающих ледников». Площадь ледника Эрмана увеличилась на 4,7 км^2, а длина достигла 21,5 км. Самые высокие темпы наступания – до 100 м/год – характерны для ледника Шмидта. Наступание ледников есть следствие латеральных и терминальных извержений вулкана Ключевской в XX и XXI вв.

Введение

Потепление климата в XXI в. привело к повышению темпов деградации горных ледников. Сравнение аэрофотоснимков конца 1950-х годов с современными космическими снимками показало, что крупнейшие ледники Северного Кавказа отступили на расстояние до 1–2 км. По площади наибольшее сокращение зафиксировано для ледника Джикиуганкез – около 6 км^2 [1, 2]. Значительное сокращение оледенения наблюдается также в Альпах [3], Гималаях [4], Тибете [5], Андах [6], Кордильерах Северной Америки [7] и в большинстве других регионов планеты [8]. На фоне общемировой тенденции деградации горного оледенения можно считать удивительными сообщения о наступании ледников Камчатки: Эрмана и Эульченок (вулканы Ключевской, Плоская Ближняя (Крестовский) и Плоская Дальняя (Ушковский)) [9], Дитмара, Халактырский и Камбальный (вулкан Авачинский), Козельский (вулкан Козельский), Корякские-I, -II и -V (влк. Корякский) [10]. Авторы решили подробнее изучить феномен наступающих ледников и определить параметры их наступания в районе Ключевского вулкана, где расположены одни из крупнейших ледников России – Эрмана и Богдановича.

Исходные материалы и их обработка

Использованы космические снимки на районы Ключевского вулкана и ледников Эрмана и Богдановича с разным разрешением (табл. 1). Кроме космических снимков, применялись отсканированные аэрофотоснимки 1949 и 1967 гг. на участок языка ледника Эрмана и топокарта 1986 г. (по состоянию на 1976 г.) масштаба 1:100 000. Снимки обрабатывались в программе ArcGIS 10.2. За основу сравнительного дешифрирования взят ортотрансформированный снимок 22.08.2012 г. SPOT 6, представленный в системе координат WGS84 в проекции UTM. Остальные космические снимки привязаны по опорным точкам (до 100–300 точек) к снимку SPOT 6. Точность проведения границ ледников в ручном режиме зависела от пространственного разрешения снимков, наличия или отсутствия тени, заснеженности поверхности и составляла в основном до 3 м. Почти полное покрытие поверхности ледников чехлом рыхлообломочного материала создавало проблему идентификации массивов и отнесения их к ледникам. Эта проблема решалась попарным сравнением разновременных снимков. С применением инструмента Swipe Layer («заштторить слой») отчётливо обнаруживались наступание того или иного массива на фоне неподвижных участков, а также пространственное перемещение отдельных участков массивов за разные периоды времени со скоростью от 1–2 до 150 м/год.

Таблица 1. **Использованные в работе космические снимки**

Спутники	Даты снимков	Разрешение снимков, м (мультиспектральные/ панхроматические)
KH-9 Hexagon	28.06.1975	–/6–9
Landsat 7 ETM+	22.09.2000 07.10.2002	30/15
QuickBird	27.09.2005	2,4/0,6
IRS P5	11.10.2007	–/2,5
WorldView-2	11.08.2011 09.09.2013	1,84/0,46
SPOT 5	17.11.2011	5/2,5
SPOT 6	22.08.2012	6/1,5
GeoEye-1	23.07.2012	1,84/0,46
Канопус-В1	07.09.2013 19.11.2013 17.09.2014 30.07.2015 01.02.2016 22.02.2016	10,5/2,1
БКА-1	30.05.2015	11/2,5
Ресурс ДК-1	02.06.2007 09.03.2009	2–3/1,0

Схема и параметры оледенения района вулкана Ключевской

Сведения о ледниках и приблизительные их параметры приведены в работах геологов и вулканологов С.А. Конради, В.И. Влодавца, Б.И. Пийпа [11–13]. Ледникам Ключевского вулкана посвящена серия работ В.Н. Виноградова и Я.Д. Муравьёва [14–23]. В них большое внимание уделено воздействию вулканизма на оледенение и приведены конкретные примеры последствий латеральных извержений Ключевского вулкана в 1953, 1966 и 1983 гг., которые вызвали резкие подвижки ледников Влодавца и Сопочного, а также разрушение ледника Келля; определены причины наступания ледника Эрмана; разработано представление о высотно-гляциальных зонах Ключевского вулкана и типах ледников.

Данные о распространении и параметрах ледников обобщены в Каталоге [24] и в работе [15]. На приведённой в этих работах схеме ледник Эрмана начинается на склонах вулкана Плоская Дальняя и контактирует с ледниками Средний и Ключевской (Ледяной пояс). В более поздней работе [19] ледник Эрмана представлен образующимся в основном из двух потоков, берущих начало с вулканов Плоская Дальняя и Ключевской. Причём за начало ледника принята отметка 4200 м на склоне Ключевского вулкана. Таким образом, длина ледника значительно увеличились – с 16,5 до 21 км, а площадь – с 34,2 до 45,1 км^2. Язык ледника показан уже не контактирующим с ледником Средним, а окаймлённым *моренными отложениями со значительным содержанием льда* (терминология авторов [19]); кроме того, ширина ледника уменьшилась. В работе [25], посвящённой извержению Ключевского вулкана в 1994 г., левый поток ледника Эрмана показан как «Чёрный ледник», а правый – как собственно ледник Эрмана. Причём эти потоки показаны объединяющимися в единый язык ниже 2000 м. В последних работах [26, 27] приводится схема ледников, основанная на данных топографической карты 1976 г., с добавлением четырёх ледников на склонах юго-восточного сектора Ключевского вулкана. На этой схеме ледник Эрмана образован в результате слияния потока льда с вулкана Плоская Дальняя и поля льда

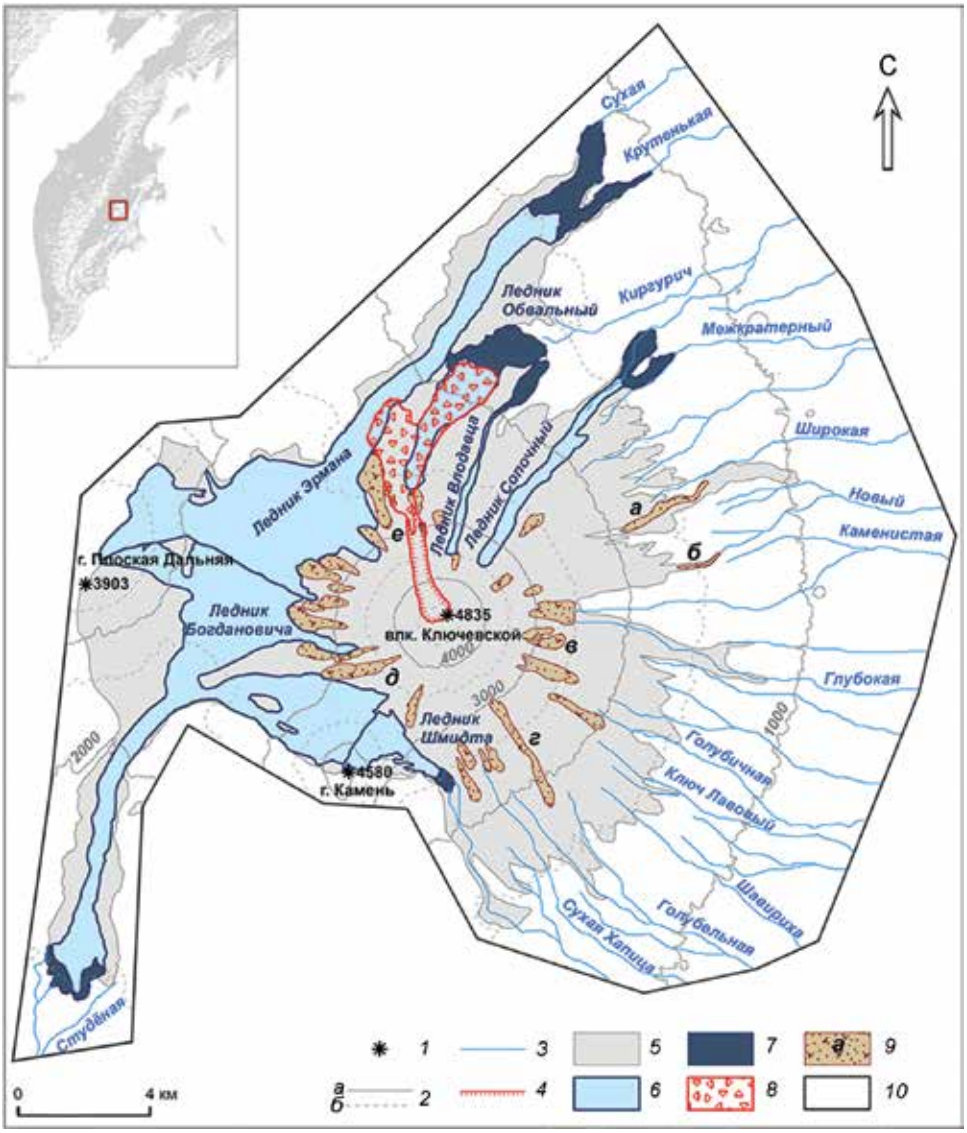

Рис. 1. Схема ледников Ключевского вулкана:
1 – вулканы; *2* – горизонтали: *а* – основные (через 1000 м), *б* – дополнительные (через 500 м); *3* – реки; *4* – Крестовский жёлоб; *5* – гляциально-перигляциальная зона; *6* – активные ледники; *7* – увеличение площади ледников в XX–XXI вв. (см. пояснения в тексте); *8* – вулканогенно-обвальные отложения 1945 г.; *9* – обломочно-ледяные массивы («блуждающие ледники»): *а* – северный массив ледника Келля, *б* – южный массив ледника Келля, *в* – восточный массив в области питания бывшего ледника Пийпа, *г* – ледник Иванова [6], *д* – юго-западный массив в области питания ледника Богдановича, *е* – ледник Логинова [6]; *10* – граница исследования

Fig. 1. Sketch map of glaciers on the Kluchevskoy volcano:
1 – volcanoes; *2* – contour lines; *a* – major lines (space between 1000 m); *б* – additional (space between 500 m); *3* – rivers; *4* – Krestovsky trough; *5* – glacial and periglacial zone; *6* – active glaciers; *7* – increase of area of glaciers in XX–XXI centuries (please see the description in the text); *8* – rock avalanche deposits and lava of the 1945 eruption; *9* – rock-ice massifs («wandering glaciers»): *a* – north part of Kell Glacier, *б* – south massif of Kell Glacier, *в* – east massif in the supply zone of former Piip Glacier, *г* – Ivanov Glacier [6], *д* – south-west massif in the supply zone of Bogdanovich Glacier, *e* – Loginov Glacier [6]; *10* – border of research area

на водоразделе с ледником Богдановича, а также потоков льда, стекающих с северо-западного и северо-восточного склонов вулкана с высоты 3000–3150 м. В результате ширина языка ледника Эрмана превысила 3 км. В работе [22] на схеме зон затопления лахарами активный поток ледника Эрмана показан окаймлённым пассивными льдами.

На основе изучения предыдущих схем оледенения и новых данных о динамике ледников, полученных в результате дешифрирования раз-

новременных аэрофотоснимков и космических снимков, авторами была составлена схема ледников, учитывающая современное их состояние и состояние в XX в. На рис. 1 показано увеличение площади ледников в XX–XXI вв. В эти контуры не включены пассивные льды – участки, на которых движение льда прекратилось, но может возобновляться по разным причинам (давление наступающего на массив ледника, оползневые пластические деформации, сейсмичность и пр.). Пассивные льды представлены частью гляциально-перигляциальной зоны, в которую входят также остатки ледников Келля и Пийпа и других былых ледников, а также моренные отложения. Общий прирост площади наступивших ледников с учётом участков пассивных льдов, которые в начале периода наступания были активными, составил: Эрмана – 4,7 км^2, Обвальный – 2,1 км^2, Влодавца – 1,0 км^2, Сопочный – 1,4 км^2 за период 1949–2016 гг.; Богдановича – 1,13 км^2 за 1975–2016 гг.; Шмидта – 0,27 км^2 за 2007–2016 гг. По сравнению с другими схемами оледенения на основе изучения морфологии и динамики участка вулканогенно-обвальных отложений извержения 1945 г. (рис. 2) авторами изменены границы ледника Эрмана из-за выделения в самостоятельный ледник потока, ранее считавшегося правым притоком ледника Эрмана.

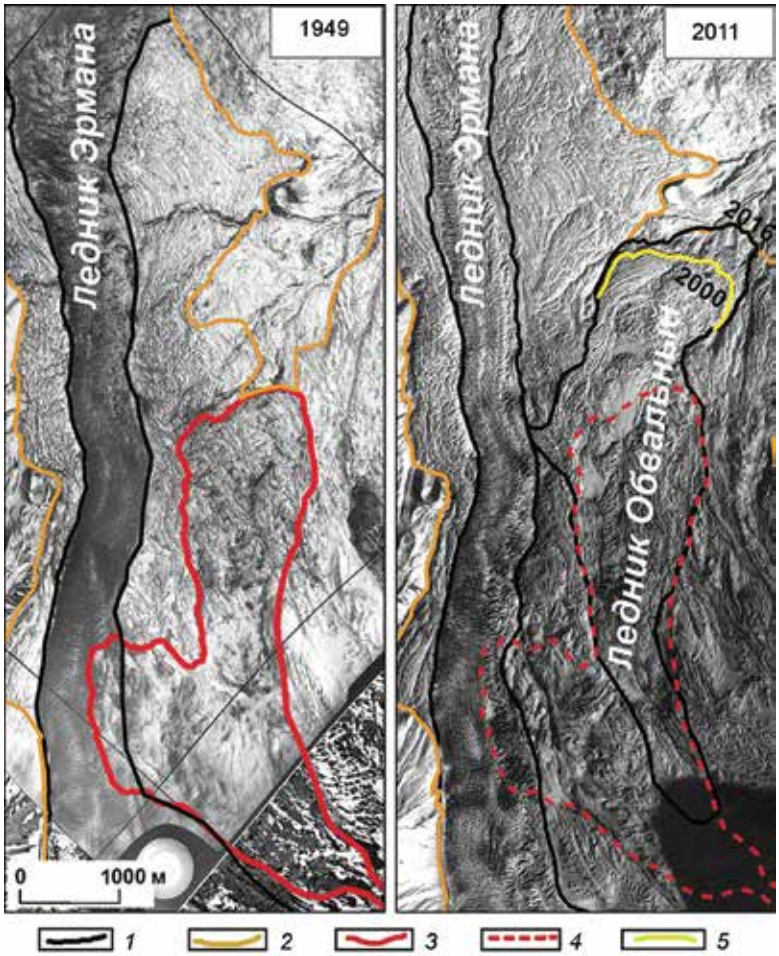

Рис. 2. Динамика участка вулканогенно-обвальных отложений 1945 г. и ледника Обвальный.
1949 г. – аэрофотоснимок; 2011 г. – космический снимок SPOT 5. *1* – активные ледники; *2* – пассивные льды; *3* – вулканогенно-обвальные отложения 1945 г.; *4* – границы вулканогенно-обвальных отложений 1945 г. на снимке 2011 г.; *5* – окончание ледника Обвальный в 2000 г.

Fig. 2. Dynamics of terrain of rock avalanche deposits 1945 and Obvalny Glacier.
1949 – aerial image; 2011 – SPOT 5 satellite image. *1* – active glaciers; *2* – passive ices; *3* – rock avalanche deposits and lava of the 1945 eruption; *4* – borders of the rock avalanche deposits and lava of the 1945 eruption on the 2011 year picture; *5* – end of Obvalny Glacier in 2000

Таблица 2. **Параметры ледников района Ключевского вулкана**

Название ледника и номер по Каталогу [13]	Источник	Длина, км	Площадь (с пассивными льдами), км^2	Абсолютная высота окончания, м
Эрмана, № 165	[22]	9,0	15,0	1500
	[13]	16,5	34,2	1360
	[6]	21,0	45,1	1115
	2016	21,5	30,3 (40,5)	1000
Обвальный	2016	6,5	6,0	1560
Влодавца, № 166	[13]	5,8	5,0	1960
	[6]	6,4	3,1	1600
	2016	6,7	1,5	1620
Сопочный, № 167	[22]	5,0	3,0	1200
	[13]	7,5	6,0	1440
	[6]	8,0	4,6	1450
	2016	8,9	4,1	1200
Шмидта, № 172	[22]	4,0	2,4	1600
	[13]	6,3	3,4	1850
	[6]	7,8	5,7	1480
	2016	4,3	2,8	2260
Богдановича, № 158	[22]	6,0	10,0	1600
	[13]	17,1	37,8	1625
	[6]	16,0	44,7	1550
	2016	16,7	27,6 (41,4)	1440

На рис. 2 (аэрофотоснимок 1949 г.) показаны выявленные по особенностям мезорельефа контуры вулканогенно-обвальных отложений извержения 1945 г., занимающие площадь около 7 км^2 и имеющие форму раздвоенного языка. Правый язык отложений 1945 г., представлявший собой образования пирокластических потоков и обвалов («горячих лавин» по Б.И. Пийпу [13]), накрыл мощным чехлом существовавший на этом месте ледник. Погребённый ледник, названный авторами Обвальный, стал активно наступать в 1970-х годах, сминая расположенные перед ним пассивные льды. На рис. 2 (фрагмент 2011 г.) показаны границы ледника в 2000 и 2016 гг. Наибольшее увеличение площади ледника Обвальный произошло в 1975–2000 гг. – 1,69 км^2. Ледник Обвальный отделён от ледника Эрмана массивом (предположительно лавы латеральных извержений 1930-х годов), свободным ото льда и сохранившимся без изменений более 60 лет. Это подтверждает отсутствие связи ледника Обвального с ледником Эрмана. Левый язык отложений 1945 г., внедрившийся в тело ледника Эрмана и растопивший его на участке площадью более 0,5 км^2, отличается слабыми изменениями. На основании этого сделан вывод, что здесь аккумулировались преимущественно лавовые потоки, стекавшие по Крестовскому жёлобу. Сведения о параметрах ледников приведены в табл. 2.

На схеме оледенения (см. рис. 1) показаны обломочно-ледяные массивы, для которых за период 1975–2016 гг. выявлены наступания. Для этих объектов подходит термин, предложенный С.А. Конради и С.В. Калесником [28], – «блуждающие ледники» – ледники вулканических сопок, не имеющие постоянных каналов стока и меняющие своё расположение и размеры в результате извержений. Языкообразная и каплевидная формы блуждающих ледников схожи с каменными глетчерами. Всего как блуждающие ледники идентифицировано более 30 объектов. Наибольшие темпы наступания установлены для блуждающего ледника, обозначенного на схеме буквой «*в*» (см. рис. 1). За период 2002–2016 гг. наступание составило более 740 м (55 м/год). Площадь увеличилась со 150 до 415 тыс. м^2.

На юго-западном склоне Ключевского вулкана обнаружено наступание блуждающего ледника «*д*», которое за 2007–2013 гг. составило 120–125 м (20 м/год). После излияния лавы на поверхность этого обломочно-ледяного массива в октябре 2013 г. [29] наступание его прекратилось, о чём свидетельствует космический снимок 2016 г. В настоящее время продолжается процесс формирования блуждающих ледников на юго-западном склоне вулкана к востоку от блуждающего ледника «*д*». Движение обломочно-ледяных масс происходит на абсолютных вы-

сотах менее 4200–4400 м. Наступание одного из новых языков составило за 2012–2016 гг. 200 м (около 60 м/год).

Наступание ледника Эрмана

Первые сведения о наступании ледника Эрмана приведены в работе Б.И. Пийпа [13], согласно которым ледник Эрмана с 1945 по 1951 г. продвинулся на 300 м – в среднем 50 м/год. Дальнейшая динамика ледника показана на рис. 3. Темпы наступания почти не изменились. Прирост ледника Эрмана за 1949–2016 гг. составил 3,3 км (в среднем 49,7 м/год). В процессе наступания ледника после 1945 г. боковые участки ледника прекратили движение и превратились в пассивные льды. Ширина таких береговых массивов из пассивных льдов достигает 500 м. Наступание ледника Эрмана в долинах рек Сухая и Крутенькая в настоящее время заметно отличается по темпам. С 2011 г. левый язык ледника в долине р. Сухая резко замедлил наступание. За последние пять лет наступание составило около 35 м (рис. 4, *а*).

На космическом снимке 2011 г. на поверхности ледника обнаружен фронт активизации, который отстоял от конца языка на расстоянии 200 м. С 2011 по 2012 г. фронт активизации продвинулся на 75–80 м. С 2014 по 2015 г. он сместился к правому склону долины и затем растёкся на всю ширину окончания языка ледника. В феврале 2016 г. на подходе к концу языка ледника уже наметился следующий фронт активизации. При этом значительно увеличились ширина окончания языка ледника и его толщина за счёт натекания на неподвижную часть нового слоя льда. В долине р. Крутенькая правый язык ледника Эрмана в 2011–2012 гг. замедлил своё наступание. Оно составило менее 20 м (см. рис. 4, *б*; табл. 3). Вместе с определением параметров наступания конца языка ледника Эрмана исследовалась динамика его поверхности.

При детальном дешифрировании снимков распознавались одни и те же характерные точки на поверхности ледника на космических снимках разных лет (точки *1–3* на рис. 4, *б*; см. табл. 3). Измерение величины их смещения за периоды от 1 до 3–4-х лет позволило выявить высокие скорости движения поверхности ледника в долине р. Крутенькая (105–150 м/год), которые превышают в 2–3 раза среднюю скорость наступания языка ледника (в среднем 54 м/год) и сохраняются вплоть до конца языка. На основании этих данных можно сделать вывод, что продвинувшийся вперёд в узком ущелье язык ледника теряет скорость движения в результате значительного бокового трения из-за многочисленных поперечных выступов. При этом верхний слой льда стекает по нижнему приторможенному слою, затем выходит

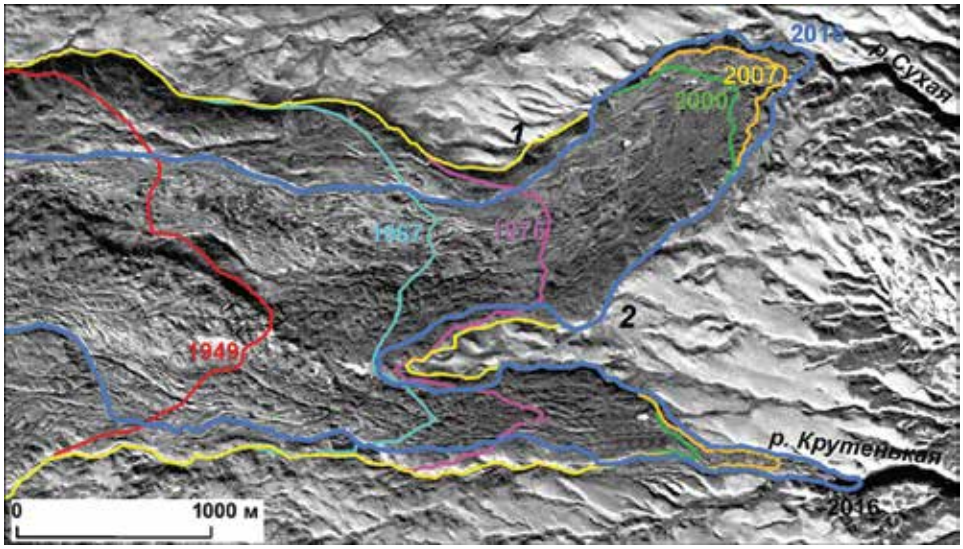

Рис. 3. Изменение границ ледника Эрмана за 1949–2016 гг.
Границы: *1* – пассивные льды; *2* – активный ледник; основа – космический снимок Канопус-В1 2014 г.
Fig. 3. Changes of borders of Erman Glacier in 1949–2016.
Borders: *1* – passive ices; *2* – active glacier; background – Canopus-B1 satellite image, 2014

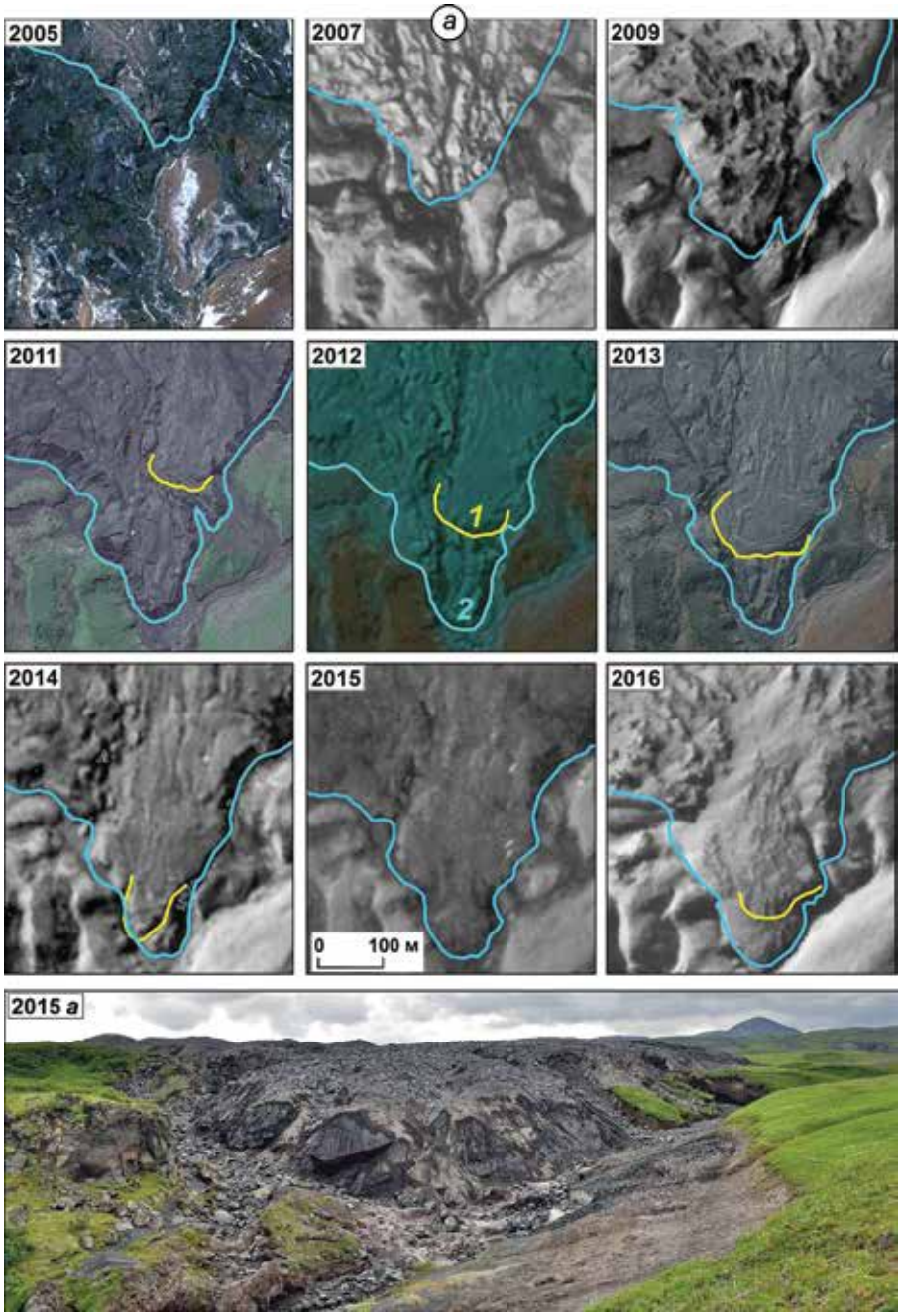

Рис. 4. Динамика левого и правого языков ледника Эрмана.

а – изменения ледника Эрмана в долине р. Сухая в 2005–2016 гг. на космических снимках: 2005 – QuickBird; 2007 и 2009 – Ресурс ДК-1; 2011 – WorldView-2; 2012 – SPOT 6; 2013 – WorldView-2; 2014–2016 – Канопус-В1; 2015 *а* – наземное фото А.Я. Муравьёва (конец ледника Эрмана в августе 2015 г.). *1* – фронт активизации ледника; *2* – граница ледника;

б – изменения ледника Эрмана в долине р. Крутенькая в 2002–2016 гг. на космических снимках: 2007 – Ресурс ДК-1 (дополнительно показан контур ледника в 2002 г.); 2011 – WorldView-2; 2012 – SPOT 6; 2013 – WorldView-2; 2014 и 2016 – Канопус-В1. Цветными точками и цифрами (*1–3*) показано положение характерных элементов поверхности ледника в разные годы

Fig. 4. Dynamics of left and right snouts of Erman Glacier.

a – Changes of Erman Glacier in Sukhaya River valley in 2005–2016 on satellite images: 2005 – QuickBird; 2007 and 2009 – Resurs-DK; 2011 – WorldView-2; 2012 – SPOT 6; 2013 – WorldView-2; 2014 and 2016 – Canopus-B1, и 2016; 2015 *a* – ground photo of snout of Erman Glacier in August 2015 (photo by A.Y. Muravyov). *1* – frontier of activation of glacier; *2* – border of glacier.

б – Changes of Erman Glacier in Krutenkaya River valley in 2002–2016 on satellite images: 2007 – Resurs-DK (contour of glacier in 2002 – additional line); 2011 – WorldView-2; 2012 – SPOT 6; 2013 – WorldView-2; 2014 and 2016 – Canopus-B1. Colored dots and numerals (*1–3*) show the position of the notable points on the surface of glacier in different years

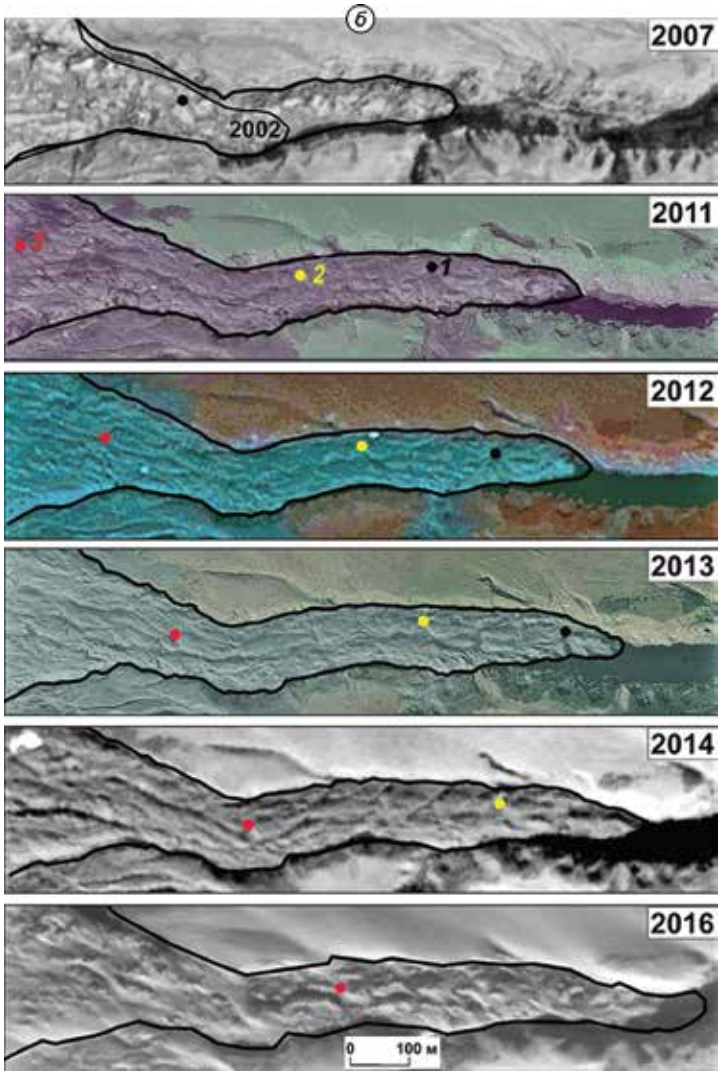

Таблица 3. **Динамика языка ледника Эрмана в долине р. Крутенькая в 2002–2016 гг.***

Временно́й интервал, годы	Смещение точек на поверхности ледника, м			Наступание ледника, м
	1	*2*	*3*	
2007–2011	435 (109 м/год)	–	–	215 (54 м/год)
2011–2012	110	105	147–150	18–20
2012–2013	115	105	125	55
2013–2014	–	125	125	40
2014–2016 (1,4 года)	–	–	160 (113 м/год)	97–100 (70 м/год)
2007–2013	656 (109 м/год)	–	–	285 (48 м/год)
2011–2014	–	340 (113 м/год)	400 (133 м/год)	115 (38 м/год)
2011–2016	–	–	560 (126 м/год)	215 (49 м/год)
2007–2016	–	–	–	425 (50 м/год)
2002–2016	–	–	–	720 (54 м/год)

*Прочерки означают отсутствие данных о величине смещения точек за указанный интервал времени.

вперёд и замедляется, становясь нижним слоем. Такой процесс натекания верхнего слоя ледника на фронтальный участок протекает непрерывно и имеет импульсный характер. Скорость наступания ледника при этом то увеличивается, то уменьшается. В настоящее время, согласно результатам дешифрирования космического снимка 2016 г., наступание ледника Эрмана продолжается.

Наступание ледника Богдановича

В работе [19] приводятся сведения о том, что ледник Богдановича последние 50 лет деградирует. Его состояние усугубилось после латеральных извержений 1937–1938 и 1974 гг., а также терминального извержения 1984–1987 гг. в области питания. Однако конкретных данных об изменении состояния ледника не приводится. Длина ледника по сравнению с Каталогом [24] показана меньше на 1,1 км, а площадь – больше на 6,9 км^2. На рис. 5 отражена динамика ледника Богдановича в 1975–2016 гг. Окончание ледника в 1975 г. чётко выделяется морфологически и имеет свежий облик. Но это не активный лёд, а неподвижные льды – застывшие предыдущие фронты активизации.

Ниже границы ледника 1975 г. находилась узкая кайма более старых пассивных льдов, пропиленных водой и разделённых таким образом на блоки. Выше границы ледника 1975 г. отчётливо виден фронт активизации, который в дальнейшем смещался главным образом в юго-западном направлении. За 1975–2002 гг. он продвинулся на 500 м. К началу XXI в. активный лёд достиг границы неподвижных льдов и стал сдвигать блоки и выдавливать их – началось наступание ледника Богдановича. Пришли в движение и старые пассивные льды. При этом из-за неоднородности массива пассивных льдов активные массы льда на отдельных участках обтекали пассивные льды, а на других – выдавливали их вниз и в стороны, частично сминая. Со временем наступающая масса ледника Богдановича становилась более однородной и двигалась единым фронтом. Прирост площади ледника в 2013–2016 гг. составил 38 тыс. м^2. На общем фоне фронта наступания шириной более 2 км выделяется узкий наступающий язык (ширина 120 м), который оканчивается на высоте около 1440–1430 м и отстоит от границы ледника в 1975 г. на расстоянии 730 м. Участок же, который был в 1975 г. концом языка ледника, продвинулся к 2016 г. на 180 м и находится на высоте около 1480 м. Оба этих участка показаны на фото Ю.В. Демянчука (см. рис. 5, 2014). Активный поток льда ледника Богдановича на расстоянии 4,5 км от западного окончания ледника движется последние четыре года со скоростью 50 м/год, а в 600 м от конца – со скоростью 20 м/год. В преде-

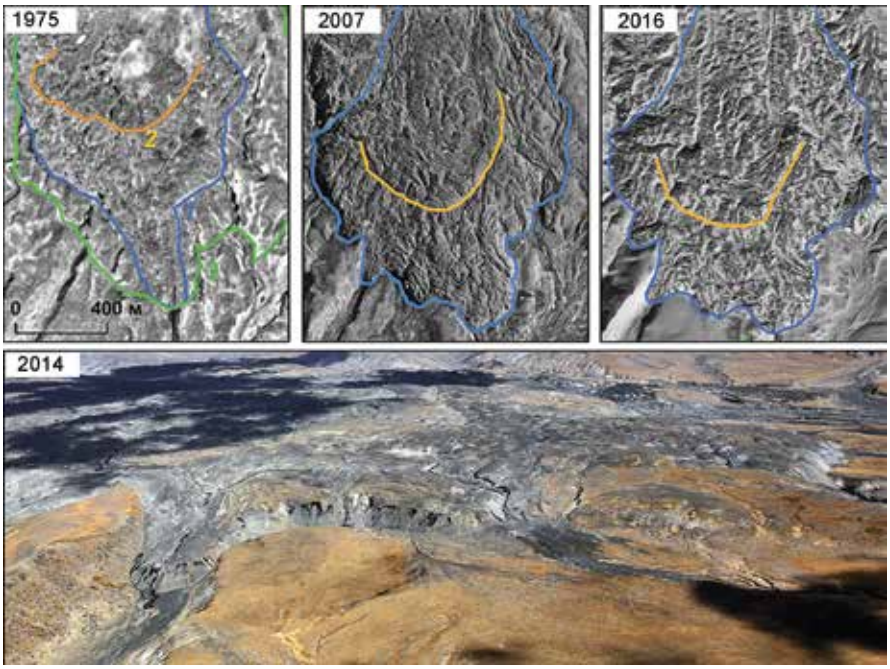

Рис. 5. Динамика ледника Богдановича за 1975–2016 гг. на космических снимках:
1975 – KH-9 Hexagon; 2007 – Ресурс ДК-1; 2016 – Канопус-В1; 2014 – вертолётный снимок Ю.В. Демянчука. *1* – граница ледника; *2* – граница старых пассивных льдов в 1975 г.; *3* – положение фронта активизации

Fig. 5. Dynamics of Bogdanovich Glacier in 1975–2016 on satellite images:
1975 – KH-9 Hexagon; 2007 – Resurs-DK; 2016 – Canopus-B1; 2014 – helicopter image by Y. Demyanchuk. *1* – border of glacier; *2* – frontier of activation; *3* – border of old stagnant ice in 1975

лах узкого наступающего языка ледника скорость движения поверхности равна 16–18 м/год, что немногим больше скорости наступания ледника 14–15 м/год. На основе этих данных можно сделать вывод, что в ближайшее время наступание ледника Богдановича продолжится.

Наступание ледника Шмидта

На топографической карте 1976 г. ледник Шмидта показан длинным узким потоком, оканчивающимся на высоте 1480 м. Ещё ниже до высоты 1360 м расположен массив пассивных льдов шириной до 700 м, прорезанный потоками рек Чернова и Сухая Хапица. Этот массив при отсутствии связи с ледником в последние годы обнаруживает наступание со скоростью до 10 м/год, а во фронтальной части – до 12 м/год. Возможно, это связано с подрезкой массива лахарами, как это произошло и на леднике Сопочном (см. далее). На космическом снимке 22 февраля 2016 г. массив фронтальным уступом уже практически перекрыл долину р. Сухая Хапица.

В XX в. ледник Шмидта, по данным [9], наступал в течение 1978–1987 гг. по поверхности мёртвых льдов, оставшихся от предыдущего наступания. Сравнение космических снимков 1975 и 2002 гг. показало, что в 1980-х годах наступание составило около 450 м. В феврале–марте 1987 г. в результате извержения область питания ледника Шмидта частично разрушилась. В работе [19] сделано предположение, что это извержение негативно скажется на состоянии ледника. Предположение оправдалось. Ледник превратился в массив мёртвых льдов, на поверхности которого не было выявлено никакого движения в 2007–2016 гг. Кроме того, значительная часть ледникового языка в самой узкой его части была размыта лахарами и водными потоками. Хорошо сохранилась часть былого ледника выше 1800–1900 м. Именно по этой омертвевшей ледниковой поверхности происходит в настоящее время наступание ледника Шмидта.

В XXI в. ледник Шмидта демонстрирует феноменально высокие темпы наступания (рис. 6). С 2007 по 2012 г. его наступление составило 500 м (100 м/год), с 2012 по 2013 г. – 105–110 м. В последние годы наступание ледника Шмидта замедлилось. С 2013 по 2016 г. (2,4 года) оно равно 105 м (43 м/год). Площадь ледника за это время возросла на 25,9 тыс. м^2. За 2007–2016 гг. абсолютная высота конца ледника понизилась с 2520 до 2260 м. Наступание ледника Шмидта не привело к движению мёртвых льдов.

Подвижки ледника Сопочный

При сравнении аэрофотоснимков 1949 и 1967 гг. установлена подвижка ледника Сопочный, вызванная латеральным извержением 1953 г. (прорыв Белянкина). Длина ледника при этом увеличилась на 1 км, а площадь – на 0,6 км^2 [14]. При прорыве Пийпа в 1966 г., по данным [16], прохождение лавового потока по долине р. Киргурич вызвало наступание ледника Сопочного. В октябре–декабре 1966 г. оно составило 15–25 м. Зимой ледник стационировал, весной он активизировался, и в 1967 г. его наступание составило 125–130 м. К 1975 г. относительно положения в 1949 г. наступание ледника было уже более 1,7 км (левый язык) и 1,4 км (правый язык).

После 1975 г. продвижение левого языка ледника не превышало 90 м, а в последние годы (2007–2016 гг.) ледник стационировал и фактически превратился в пассивные льды. На правом языке ледника на высоте 1400 м в период 1975–2000 гг. установлена локальная оползневая подвижка. В рельефе отчётливо просматриваются зоны отрыва и транзита площадью 0,125 км^2 – воронкообразная ниша шириной 250 м и ложбина шириной до 100–130 м и длиной порядка 850 м. Сползший материал откладывался в основном ниже конца ледника. Таким образом, длина ледника увеличилась на 400 м. После лахара, прошедшего, по данным [22], 14 мая 2007 г., на теле правого языка ледника Сопочный образовался врез шириной до 20–30 м. В концевой части ледника вдоль вреза произошла небольшая подвижка на площади около 15 тыс. м^2 с величиной смещения до 20–25 м.

Подобная подвижка оползневого характера зафиксирована на теле северного останца *ледника Келля* (блуждающий ледник «*а*» на рис. 1) в результате дешифрирования космических снимков 1975 и 2007 гг. Массив шириной до 180–200 м и протяжённостью более 1 км продвинулся по поверхности пассивного ледника Келля на расстояние более 500 м. Южный останец ледника Келля испытал воздействие лавовых потоков,

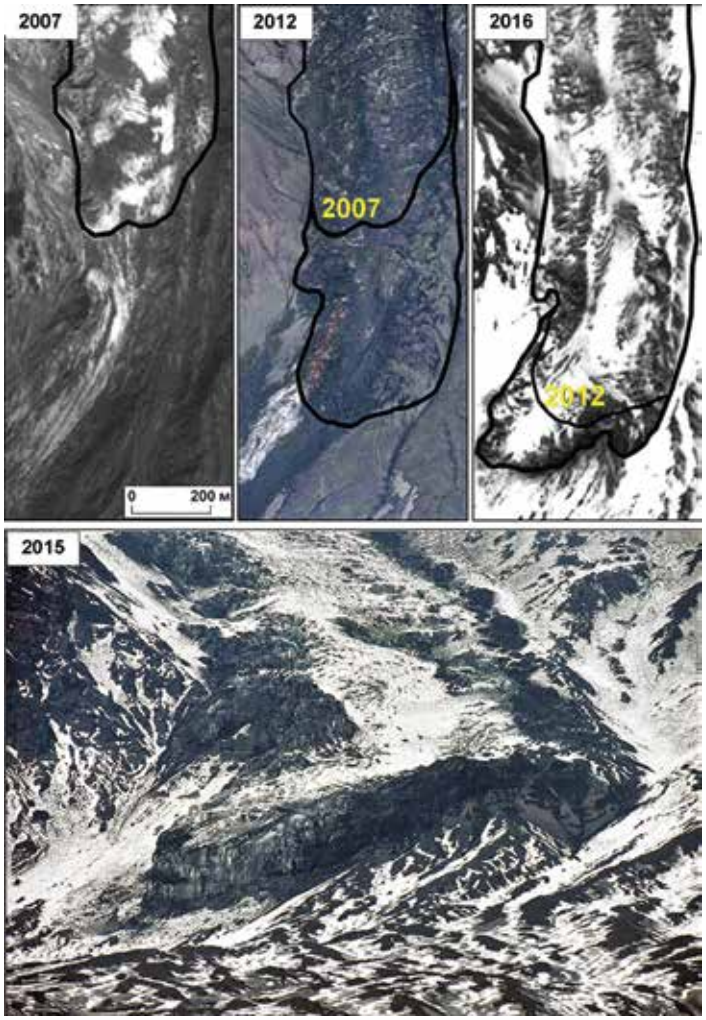

Рис. 6. Динамика ледника Шмидта в 2007–2016 гг. на космических снимках:
2007 – Ресурс ДК-1; 2012 – GeoEye-1 (показана граница ледника в 2007 г.); 2016 – Канопус-В1 (показана граница ледника в 2012 г.); 2015 – наземное фото М.Д. Докукина

Fig. 6. Dynamics of Schmidt Glacier in 2007–2016 on satellite images:
2007 – Resurs-DK; 2012 – GeoEye-1 (border of glacier in 2007); 2016 – Canopus-B1 (border of glacier in 2012); 2015 – ground photo by M.D. Dokukin

деформировавших его тело. В результате в 1975–2002 гг. произошло его наступание на расстояние около 130 м.

Наступание ледников Влодавца и Обвальный

По данным [14], в 1966 г. в результате латерального извержения (прорыв Пийпа) произошла подвижка ледника Влодавца, который продвинулся на 900 м и его площадь стала больше на 0,3 км^2. К 1975 г. длина ледника Влодавца, по нашим данным, увеличилась на 1,7 км. За 1975–2007 гг. ледник Влодавца наступил на 420–425 м. В дальнейшем наступание продолжилось и в движение был вовлечён массив пассивных льдов, находившийся перед фронтом ледника, который сместился на расстояние до 40 м. С присоединённым к леднику Влодавца массивом наступание за 2007–2016 гг. составило более 160 м. Ледник Обвальный за этот же период продвинулся на 200 м (около 24 м/год) и в настоящее время соприкасается с ледником Влодавца. На большей части поверхности ледника Обвальный в осевой зоне смещение точек составило 160–180 м и только в концевой части превысило 200 м, где углы наклона подстилающей поверхности превышали 20°.

О причинах наступания ледников (обсуждение результатов)

Определив основные параметры наступания ледников, авторы попытались выяснить причины этого неординарного процесса. В работе [9] с использованием данных ГМС в с. Ключи, расположенной в 31 км от вершины Ключевского вулкана, показано, что летние температуры воздуха в 1989–2006 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. в среднем выросли на 1 °С, а суммы твёрдых осадков в 1989–2006 гг. по сравнению с 1966–1980 гг. в среднем сократились на 3,5%. Такие климатические изменения способствовали сокращению большинства ледников Камчатки, а не их наступанию.

Большинство исследователей считают основной причиной непрерывного наступания ледника Эрмана в течение длительного периода – катастрофическое склоновое вулканогенно-гравитационное явление, которое сопровождало пароксизмальное извержение Ключевского вулкана в 1945 г. Это явление получило название «вулкано-гляциальный оползень» [20, 21], подвижка-оползень ледника [19], обвал [30], обрушение льдонасыщенных масс [22], падение вулканических бомб и «горячие лавины» [13]. Считается, что массы изверженного материала и льда объёмом 250–300 млн м^3 сошли в область питания ледника Эрмана [21, 23, 27], после чего он начал наступать. На связь наступания ледника Эрмана с последствиями извержения 1945 г. и обрушениями масс по Крестовскому жёлобу указывается в работах [9, 19].

По нашим данным, основная масса обломочного материала отложилась не на леднике Эрмана, а на соседнем с ним леднике, который спускался со склона вулкана (см. рис. 1, 2). Язык ледника Эрмана испытал воздействие пирокластических и лавовых потоков, которые внедрились в ледник на расстояние до 250–350 м (1/3 всей ширины ледника) и расплавили его, уничтожив перед этим ледник, существовавший у подножия склона на месте современного Крестовского жёлоба и бывший притоком ледника Эрмана. Вероятно, воздействие извержения 1945 г. не могло вызвать его дальнейшее длительное (в течение 70 лет) наступание. Оно могло быть причиной наступания ледника Обвального вследствие бронирования его от абляции и возникновения дополнительной нагрузки.

Сокращение льда в области питания ледника Эрмана во время латеральных извержений 1930-х годов, охарактеризованных в работах [13, 31], привело из-за лишения необходимой подпитки к формированию широкого поля пассивных льдов в высотной зоне 1500–1700 м, где оканчивался в то время ледник. При извержениях 1930-х годов большое количество вулканического материала поступило в область питания ледника Эрмана (плато «Малая Антарктида»), в результате чего, возможно, увеличилась абсолютная высота подлёдного ложа, изменилось положение ледораздела с ледником Богдановича и, как следствие, выросла площадь области питания. Дальнейшее восстановление области питания ледника Эрмана привело к большему накоплению льда, чем до этих извержений. Возрождённый активный поток ледника Эрмана стал наступать и продвигаться в области пассивных льдов как второй ярус, возвышаясь над ними. Это хорошо вписывается в концепцию В.Н. Виноградова [19]: «Большое мореносодержание льда, определяемое поступлением рыхлого вулканического материала, обеспечивает быстрое бронирование продвинувшегося потока льда и стационирование его фронта на более низком уровне. При достаточно быстром восстановлении области питания происходят повторные подвижки льда, который или подпитывает язык и стимулирует его дальнейшее продвижение вниз по склону, или надстраивает новый ярус-этаж».

Подобным образом можно объяснить причину наступания ледника Шмидта как повторную подвижку ледника после разрушения части области питания в результате извержений. Стационирование ледника Сопочный, вероятно, связано с быстрым сбросом массы льда при его подвижке. Продолжающееся наступание ледника Влодавца, по нашему мнению, происходит в результате значительного уменьшения ширины ледника в зоне транзита. Наступание ледника Богдановича следует считать восстановлением его после нескольких извержений в XX и XXI вв., значительно разрушивших область питания. Быстрые подвижки ледников, примерами которых могут быть подвижки ледников Влодавца и Сопочный, происходят в результате воздействия латеральных извержений в области концов языков и насыщения ледников талой водой, а также поступления большого количества воды на ложе ледников. Подвижкам способствуют фреатические взрывы и сейсмическая активность.

На фоне общей тенденции наступания ледников в период их восстановления после разрушения области питания возможны реакции ледни-

ков на действия других вулканических факторов, как ослабляющих темпы наступания, так и усиливающих. В работе [14] сделано предположение, что ледник Эрмана «вступил в стадию деградации» в конце 1960-х годов и указывается на наличие признаков активизации в 1972 г.

Формирование блуждающих ледников, которые создали целый пояс на склонах Ключевского вулкана, происходит непрерывно. Одни языки после сползания превращаются в пассивные льды, другие находятся в стадии наступания, как блуждающий ледник «*в*» на рис. 1. Область питания блуждающих ледников – верхний пояс Ключевского вулкана до высоты 4250 м, названный В.И. Влодавцем «ледниковый воротник» [12] «из перемежающихся слоёв фирнового льда и отложений мелких рыхлых вулканических продуктов». Наиболее активная зона формирования блуждающих ледников в настоящее время – юго-западный склон вулкана, где друг на друга со скоростью до 60 м/год натекают каплевидные обломочно-ледяные тела. Ранее этот пояс считался наиболее инертным и малоподвижным. Факторы формирования блуждающих ледников и их связь с верхним поясом Ключевского вулкана недостаточно изучены, что требует проведения более углублённого самостоятельного исследования.

Заключение

Проведённые исследования процесса наступания ледников в неблагоприятных для этого климатических условиях позволили оценить современное состояние крупного узла оледенения Камчатки, установить значительное разнообразие в темпах наступания ледников и ледниково-обломочных тел, количественно охарактеризовать скорости движения льда в разных частях ледников, определить причины феноменального наступания ледников. Использование разновременной аэрокосмической информации (в том числе самые свежие снимки российских космических аппаратов) и ГИС-технологий их обработки показало огромные возможности и хорошие перспективы космического мониторинга ледников.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Ю.В. Демянчуку и коллективу Камчатской вулканологической станции имени Ф.Ю. Левинсона-Лессинга за помощь в проведении полевых маршрутов, в поиске литературы, в предоставлении фото- и видеоматериала, за анализ материалов; А.Я. Муравьёву (Институт географии РАН) – за аэрофотоснимки и фотоматериалы, а также обсуждение результатов. Авторы благодарят специалистов ФГБУ «НИЦ «Планета» А.А. Невского, Н.И. Абросимова и В.В. Асмуса за оперативно предоставленные космические снимки Канопус-В1. Исследования проведены в рамках темы 1.3.4.2 Плана НИОКР Росгидромета на 2014–2016 гг. и при поддержке РФФИ (проект № 14-05-00768).

Acknowledgments. The authors would like to thank the collective of the F.Yu. Levinson-Lessing Kamchatkan Volcanological Station for assistance in field routes conducting, in search of the literature, providing photo and video materials and discussion of the results; Anton Muravyov (Institute of Geography, Russian Academy of Sciences IGRAS), for providing aerial photos and and photographic materials as well as the discussion of the results. The authors would also like to thank FSBI SRC «Planeta» experts, Artem Nevsky, Nikolay Abrosimov and Vasiliy Asmus for prompt provision of satellite images Canopus-B1. Our Research is conducted under the theme of Roshydromet R & D Plan 2014–2016, and supported by RFBR (grant № 14-05-00768).

Литература

1. *Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Багов А.М., Маркина А.В.* О перестройке гидрографической сети северо-восточного подножия Эльбруса // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 23–30. doi: 10.15356/2076-6734-2012-2-23-30.
2. *Золотарёв Е.А., Харьковец Е.Г.* Эволюция оледенения Эльбруса после малого ледникового периода // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 15–22. doi: 10.15356/2076-6734-2012-2-15-22.
3. *Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T., Haeberli W.* Rapid disintegration of Alpine glaciers observed

References

1. *Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bagov A.M., Markina A.V. O perestroyke gidrograficheskoy seti severo-vostochnogo podnozhiya El'brusa.* On the restructuring of drainage network of the base of Mount Elbrus. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2012, 2 (118): 23–30. doi: 10.15356/2076-6734-2012-2-23-30 [In Russian].
2. *Zolotaryov E.A., Kharkovets E.G.* Evolyutsiya oledeneniya El'brusa posle malogo lednikovogo perioda. Development of glaciers of Mount Elbrus after the Little Ice Age. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2012, 2 (118): 15–22. doi: 10.15356/2076-6734-2012-2-15-22 [In Russian].

with satellite data // Geophys. Research Letters. 2004. № 31. L21402. doi:10.1029/2004GL020816.
4. *Xu J., Grumbine R.E., Shrestha A., Eriksson M., Yang X., Wang Y., Wilkes A.* The melting Himalayas: cascading effects of climate change on water, biodiversity, and livelihoods // Conservation Biology. 2009. V. 23. Is. 3. P. 520–530.
5. *Qiu J.* Tibetan glaciers shrinking rapidly. Nature News. 2012. doi:10.1038/nature.2012.
6. *Vilímek V., Zapata M., Klimeš J., Patzelt Z., Santillán N.* Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru // Landslides. 2005. V. 2. P. 107–115. doi: 10.1007/s10346-005-0052-6.
7. Электронный ресурс: *Williams R.S. Jr., Ferrigno J.G.* (eds.) Satellite Image Atlas of Glaciers of the World – North America. U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-J. Washington D.C., USA: United States Government Printing Office. http://pubs.usgs.gov/pp/p1386j/
8. *Orlove B., Wiegandt E., Luckman B.H.* Darkening peaks: glacier retreat, science, and society. Berkeley: Univ. of California Press, 2008. 296 p.
9. *Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я., Рототаева О.В., Никитин С.А., Зверкова Н.М.* Современные изменения ледников горных районов России. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2015. 288 с.
10. *Маневич Т.М., Муравьёв Я.Д., Самойленко С.Б.* Ледники Авачинской группы вулканов: современное состояние // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 3. С. 14–26. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-14-26.
11. *Конради С.А., Келль Н.Г.* Геологический отдел Камчатской экспедиции 1908–1911 гг. // Изв. РГО. 1925. Т. 57. Вып. 1. С. 3–32.
12. *Влодавец В.И.* Ключевская группа вулканов // Тр. Камчатской вулканологической станции. 1940. Вып. 1. 124 с.
13. *Пийп Б.И.* Ключевская сопка и её извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаборатории вулканологии АН СССР. 1956. Вып. 11. 307 с.
14. *Виноградов В.Н.* Подвижки ледников на Ключевской группе вулканов Камчатки // МГИ. 1974. Вып. 24. С. 137–140.
15. *Виноградов В.Н.* Современное оледенение районов активного вулканизма Камчатки. М.: Наука, 1975. 103 с.
16. *Виноградов В.Н.* Вулканизм и оледенение // Гляциологические исследования. 1985. № 27. С. 7–25.
17. *Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д.* Изменчивость современных ледников вулканических районов Камчатки // МГИ. 1982. Вып. 42. С. 164–170.
18. *Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д.* Взаимодействие лавы и льда на Ключевском вулкане при извержении 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 29–46.
19. *Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д.* Особенности развития ледников в условиях активного вулканизма // МГИ. 1989. Вып. 66. С. 93–99.
20. *Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н.* Прогнозная оценка динамики ледниковых масс в вулка-

3. *Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T., Haeberli W.* Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. Geophys Research Letters. 2004, 31: L21402. doi:10.1029/2004GL020816.
4. *Xu J., Grumbine R., Shrestha A., Eriksson M., Yang X., Wang Y., Wilkes A.* The melting Himalayas: cascading effects of climate change on water, biodiversity, and livelihoods. Conservation Biology. 2009, 23 (3): 520–530.
5. *Qiu J.* Tibetan glaciers shrinking rapidly. Nature News. 2012. doi:10.1038/nature.2012.
6. *Vilímek V., Zapata M., Klimeš J., Patzelt Z., Santillán N.* Influence of glacial retreat on natural hazards of the Palcacocha Lake area, Peru. Landslides. 2005, 2: 107–115. doi: 10.1007/s10346-005-0052-6.
7. *Williams R.S. Jr., Ferrigno J.G.* (eds.) Satellite Image Atlas of Glaciers of the World – North America. U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-J. Washington D.C., USA: United States Government Printing Office. http://pubs.usgs.gov/pp/p1386j/
8. *Orlove B., Wiegandt E., Luckman B.H.* Darkening peaks: glacier retreat, science, and society. Berkeley: Univ of California Press. 2008: 296 p.
9. *Kotlyakov V.M., Khromova T.Y., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muraviev A.Y., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M.* Recent glacier changes in mountain regions of Russia. Moscow: KMK Scientific Press. 2015: 288 p. doi: 10.15356/2076-6734-2015-3-14-26 [In Russian].
10. *Manevich T.M., Murav'ev Y.D., Samoilenko S.B.* Glaciers of the Avachinskaya volcano group: current condition (state). *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2015, 55 (3): 14–26. [In Russian].
11. *Konradi S.A., Kell N.G. Geologicheskiy otdel Kamchatskoy ekspeditsii 1908–1911 gg.* Geological division of Kamchatka expedition in 1908–1911. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. Herald of the Russian Geographical Society. 1925, 57 (1): 3–32. [In Russian].
12. *Vlodavets V.I. Klyuchevskaya gruppa vulkanov.* Klyuchevskaya volcano group // *Trudy Kamchatskoy vulkanologicheskoy stantsii*. Proc. of the Kamchatka volcanological station. 1940, 1: 124 p. [In Russian].
13. *Piip B.I. Klyuchevskaya sopka i eyo izverzheniya v 1944–1945 gg. i v proshlom.* Klyuchevskaya Sopka and its eruptions in 1944–1945 and in the past. *Trudy Laboratorii vulkanologii AN SSSR*. Proc. of the Laboratory of Volcanology, USSR Academy of Sciences. 1956, 11: 307. [In Russian].
14. *Vinogradov V.N. Podvizhki lednikov na Klyuchevskoe gruppe vulkanov Kamchatki.* Surges of glaciers at Klyuchevskaya volcano group. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1974, 24: 137–140. [In Russian].
15. *Vinogradov V.N. Sovremennoe oledenenie rayonov aktivnogo vulkanizma Kamchatki.* Modern glaciation of active volcanism areas in Kamchatka. Moscow: Nauka, 1975: 103 p. [In Russian].
16. *Vinogradov V.N. Vulkanizm i oledenenie*. Volcanism and glaciation. *Glyaciologicheskie issledovaniya*. Glaciological Studies. 1985, 27: 7–25. [In Russian].
17. *Vinogradov V.N., Murav'ev YA.D. Izmenchivost' sovremennykh lednikov vulkanicheskikh rayonov Kamchatki.* Variability of modern glaciers in volcanic areas of Kamchatka. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1982, 42: 164–170. [In Russian].
18. *Vinogradov V.N., Murav'ev YA.D. Vzaimodeystvie lavy i l'da na Klyuchevskom vulkane pri izverzhenii 1983 g.* Lava and ice interaction at the Klyuchevskoy volcano during the 1983 eruption. *Vulkanologiya i seysmologiya*. Journ. of Volcanology and Seismology. 1985, 1: 29–46. [In Russian].
19. *Vinogradov V.N., Muraviev Ya.D.* Peculiarities of the development of glaciers in conditions of the active volcanism. *Mate-*

нотектонических желобах Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 43–53.
21. *Муравьев Я.Д., Муравьев А.Я., Осипова Г.Б.* Ледниковые подвижки в районах активного вулканизма (Камчатка) // Тез. XV Гляциол. симпозиума. Казань, 2010. С. 23.
22. *Муравьев Я.Д., Клименко Е.С.* Вулкано-гляциальное взаимодействие: ГИС-приложения к оценке лахароопасности (на примере Камчатки) // Лёд и Снег. 2014. № 4 (128). С. 32–42. doi: 10.15356/2076-6734-2014-4-32-42.
23. Электронный ресурс: *Муравьев Я.Д., Муравьев А.Я., Осипова Г.Б.* Особенности динамики ледяных массивов на действующих вулканах, Камчатка // 7th Biennial Workshop on Japan–Kamchatka–Alaska Subduction Processes: Mitigating Risk through International Volcano, Earthquake, and Tsunami Science. JKASP 2011. Petropavlovsk-Kamchatsky. Russia. August 25–30. 2011. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS. P. 93. http://www.kscnet.ru/ivs/slsecret/jkasp_2011/abstr/abs42.pdf
24. Каталог ледников СССР. Т. 20. Камчатка. Ч. 2–4. Бассейны рек Тихого океана (Охотское и Берингово моря). Л.: Гидрометеоиздат. 1968. 76 с.
25. *Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дрознин В.А., Двигало В.Н., Демянчук Ю.В., Иванов В.В., Белоусов А.Б., Фирстов П.П., Гаврилов В.А., Ящук В.В., Округина А.М.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября – 2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 3–16.
26. *Kuksina L., Klimenko E., Muraviev Ya.* Lahar danger of Kliuchevskoy volcano massif (Kamchatka) // 7th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes: Mitigating Risk through International Volcano, Earthquake, and Tsunami Science (JKASP 2011). August 25–30, 2011, Petropavlovsk-Kamchatsky. 2011. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS. P. 89–90.
27. Электронный ресурс: *Осипова Г.Б.* Эрмана (ледник). Научно-популярная энциклопедия «Вода России». http://water-rf.ru/Водные_объекты/938/Эрмана_(ледник)
28. *Калесник С.В.* Горные ледниковые районы СССР. Л.-М.: Гидрометеоиздат, 1937. 182 с.
29. *Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Демянчук Ю.В.* Извержения вулкана Ключевской в 2012–2013 гг. // Материалы ежегодной конф., посвящ. Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: изд. ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 46–52.
30. *Двигало В.Н., Мелекесцев И.В.* Крупные современные обвалы на конусе вулкана Ключевской (по результатам ревизии последствий событий 1944–1945 и 1984–1985 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 3–17.
31. *Меняйлов А.А.* Динамика и механизм извержений Ключевского вулкана в 1937–1938 гг. // Тр. лаборатории вулканологии и Камчатской вулканологической станции. М.: Изд-во АН СССР, 1947. Вып. 4. С. 3–91.

rialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies 1989, 66: 93–99. [In Russian].
20. *Murav'ev Y.D., Salamatin A.N. Prognoznaya otsenka dinamiki lednikovykh mass v vulkanotektonicheskikh zhelobakh Klyuchevskogo vulkana*. Forecast assessment of glacier masses in volcano-tectonic troughs of Klyuchevskoy volcano. Journ. of Volcanology and Seismology. 1993, 4: 43–53. [In Russian].
21. *Murav'ev Y.D., Murav'ev A.Y., Osipova G.B. Lednikovye podvizhki v rayonakh aktivnogo vulkanizma (Kamchatka).* Glacier surges in the areas of active volcanism (Kamchatka). *Tezisy XV Glyatsiologicheskogo simpoziuma.* Abstracts of XV Glaciological Symposium. Kazan'. 2010: 23. [In Russian].
22. *Muraviev Y.D., Klimenko E.S.* Volcanic-glacial interactions: GIS applications to the assessment of lahar hazards (case study of Kamchatka). *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2014, 4 (128): 32–42. doi: 10.15356/2076-6734-2014-4-32-42 [In Russian]
23. *Murav'ev Y.D., Murav'ev A.YA., Osipova G.B.* Features of dynamics of ice files on active volcanoes, Kamchatka. 7th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes: Mitigating Risk through International Volcano, Earthquake, and Tsunami Science. JKASP 2011. Petropavlovsk-Kamchatsky. Russia. August 25–30. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS. 2011: 93. http://www.kscnet.ru/ivs/slsecret/jkasp_2011/abstr/abs42.pdf
24. *Katalog lednikov SSSR.* USSR Glacier Inventory. V. 20. Kamchatka. P. 2–4. *Basseyny rek Tikhogo okeana (Okhotskoe i Beringovo morya).* Pacific Basin Rivers (Sea of Okhotsk and Bering Sea). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 76 p. [In Russian].
25. *Ozerov A.Y., Karpov G.A., Droznin V.A., Dvigalo V.N., Demyanchuk Y.V., Ivanov V.V., Belousov A.B., Firstov P.P., Gavrilov V.A., Yahchuk V.V., Okrugina A.M. Dinamika izverzheniya Klyuchevskogo vulkana 7 sentyabrya – 2 oktyabrya 1994 g. (Kamchatka).* Dynamics of Klyuchevskoy volcano eruption 7 September – 2 October 1994. Journ. of Volkanology and Seismology. 1996, 5: 3–16. [In Russian].
26. *Kuksina L., Klimenko E., Muraviev Ya.* Lahar danger of Kliuchevskoy volcano massif (Kamchatka). 7th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes: Mitigating Risk through International Volcano, Earthquake, and Tsunami Science (JKASP 2011). August 25–30, 2011, Petropavlovsk-Kamchatsky. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2011: 89–90.
27. *Osipova G.B. Ermana (lednik).* Erman (glacier). *Nauchno-populyarnaya entciklopediya «Voda Rossii».* Scientific and popular encyclopedia on Water of Russia. http://water-rf.ru/Водные_объекты/938/Эрмана_(ледник) [In Russian].
28. *Kalesnik S.V. Gornye lednikovye rajony SSSR.* Mountain glaciated regions of the USSR. Leningrad–Moscow: Gidrometeoizdat, 1937. 182 p. [In Russian].
29. *Girina O.A., Manevich A.G., Mel'nikov D.V., Nuzhdaev A.A., Demyanchuk YU.V. Izverzheniya vulkana Klyuchevskoj v 2012–2013 gg.* Eruptions of Klyuchevskoy volcano in 2012–2013. *Materialy ezhegodnoy konferentsii, posvyashchyonnoy Dnyu vulkanologa «Vulkanizm i svyazannye s nim protsessy».* Proc. of annual conf. on «Volcanism and related phenomena» dedicated to the Volcanologist Day. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS DVO RAN. 2014: 46–52. [In Russian].
30. *Dvigalo V.N., Melekestsev I.V. Krupnye sovremennye obvaly na konuse vulkana Klyuchevskoy (po rezul'tatam revizii posledstviy sobytiy 1944–1945 i 1984–1985 gg.)* Large modern. *Vulkanologiya i sejsmologiya.* Journ. of Volcanology and Seismology. 2000, 1: 3–17. [In Russian].
31. *Menyailov A.A. Dinamika i mekhanizm izverzheniy Klyuchevskogo vulkana v 1937–1938 gg.* Dynamics and mechanism of Klyuchevskoy volcano eruptions in 1937–1938. *Trudy laboratorii vulkanologii i Kamchatskoy vulkanologicheskoy stantsii.* Proc. of the Laboratory of Volcanology and Kamchatka Volcanological Station. Moscow: USSR Academy of Sviences, 1947, 4: 3–91. [In Russian].