

Колебания ледников Ключевской группы вулканов во второй половине XX – начале XXI вв.

© 2016 г. А.Я. Муравьев¹, Я.Д. Муравьев²

¹Институт географии РАН, Москва, Россия;

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

¹anton-yar@rambler.ru

Fluctuations of glaciers of the Klyuchevskaya group of volcanoes in the 20th – 21st centuries

A.Ya. Muraviev¹, Ya.D. Muraviev²

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

²Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

¹anton-yar@rambler.ru

Received May 21, 2016

Accepted September 5, 2016

Keywords: *glaciers, glacier fluctuations, glacier inventory, Kamchatka, space survey.*

Summary

Changes in sizes of the Klyuchevskaya volcanic group's glaciers had been estimated for the period from 1949–1950 to 2010–2015 using results of analysis of current satellite imagery, data of field observations and historic records. Changes in front positions for some glaciers were analyzed for different periods of time. According to results of comparison between our data and similar ones from the Glacier Inventory the glacier areas decreased by 0.7%. Calculations made with corrected data demonstrated the total increase of the glaciation area by 4.3%. Glaciation of the Klyuchevskoy volcano is characterized by dynamic instability and significant changeability. The Erman glacier, the largest one in this region, did constantly advance since 1945. In 1949–2015, its area at the front increased by 4.96 ± 0.39 km², while the front advanced along the valley of the Sukhaya River by approximately 3675 ± 15 m and by 3480 ± 20 m along the valley of the Krutenkaya River. A number of «wandering glaciers» located on the North-Eastern and Eastern slopes of the volcano, on the contrary, significantly reduced their areas. At the same time, formation of new flows of ice is noticed within the «ice belt». Under the influence of active volcanic processes, the configuration of glacier boundaries on the slopes of Klyuchevskoy volcano does actively change in not only the tongue areas but also in the accumulation areas. Changes in dynamics of the glaciation areas of the Klyuchevskaya group of volcanoes don't correspond to the present-day climate changes. The interaction of modern volcanism and glaciation in the area as a whole is conducive to the preservation and development of glaciers, despite the deterioration of climatic conditions of their existence.

Поступила 21 мая 2016 г.

Принята к печати 5 сентября 2016 г.

Ключевые слова: *Камчатка, каталог ледников, колебания ледников, космическая съёмка, ледники.*

По результатам анализа современных космических снимков, материалам полевых работ и историческим данным оценено изменение размеров ледников Ключевской группы вулканов с 1949–1950 по 2010–2015 гг. Прослежено изменение фронтов ряда ледников за разные периоды времени. Площадь ледников по сравнению с данными Каталога сократилась на 0,7%, но после коррекции данных выяснилось, что площадь оледенения выросла на 4,3%.

Введение

Ключевская группа вулканов – один из основных центров оледенения Камчатки. На этом сравнительно компактном (около 8500 км²) вулканическом массиве расположено 25,8% (по данным Каталога ледников СССР) площади оледенения полуострова. При этом доля района в общем количестве ледников Камчатки равняется всего 7,7% [1]. Специфическая особенность этого центра оледенения – современная вулканическая деятельность, непосредственно влияющая на морфологию, режим и колебания ледников.

Исторически сложилось так, что именно Ключевская группа вулканов стала одним из наиболее изученных ледниковых районов Камчатки. Исследователей привлекали специфические черты ледников района, находящихся под влиянием активного вулканизма: морфологическое наследование форм вулканогенного рельефа, сильная заморенность поверхности, динамичность и т.п.

Известный исследователь, русский геолог К.И. Богданович (1864–1947 гг.), путешествуя по Камчатке, обратил внимание на своеобразие ледников полуострова, связанное с вулканической деятельностью [2], и предложил Русскому географическому обществу

ческому обществу организовать их изучение. До конца 1950-х годов изучение ледников и снежного покрова Камчатки не было непосредственной целью работ [3]. Гляциологические данные получали попутно при выполнении геологических, вулканологических, ботанических и иных исследований. Сведения о ледниках в публикациях этого периода носят преимущественно описательный характер.

С 1963 г. Институтом вулканологии СО АН СССР были начаты систематические работы по изучению современного оледенения вулканических районов Камчатки. Проведена каталогизация ледников [1]. Естественно, исследователи обращали внимание на специфику оледенения вулканических районов и влияние вулканизма на снежный покров и ледники. В 1970-х годах в районе Ключевской группы вулканов велись полустационарные гляциологические, метеорологические и иные наблюдения. В 1980–90-х годах изучали режим и колебания ледников, существующих в разной геодинамической обстановке (вулканические, невулканические и районы четвертичного вулканизма).

Современные исследования ледников Ключевской группы вулканов базируются на сочетании маршрутных наблюдений и анализа данных дистанционного зондирования Земли. Однако опубликованные сведения о современном состоянии ледников носят фрагментарный характер и не отражают целостной картины состояния оледенения района. Цель работы — исследовать изменения размеров и положения ледников Ключевской группы вулканов со времени их каталогизации, а также особенности их динамики по сравнению с ледниками невулканических регионов.

Район исследований

Ключевская группа вулканов расположена на полуострове Камчатка в северной части Камчатской депрессии. Это — крупное вулканическое плато высотой 900–1100 м с несколькими вулканами: Ключевской (~4750–4850 м — высота изменяется в зависимости от состояния активности вершинного кратера), Камень (4579 м), Безымянный (2869 м), Ушковский (3903 м), Крестовский (4057 м), Овальная Зими́на (3080 м), Острый Толбачик (3672 м) и др. (рис. 1).

Район защищён от непосредственного влияния Охотского и Берингова морей Срединным и

Восточным хребтами. Климатическая обстановка района Ключевской группы вулканов имеет континентальные черты [4] и складывается под влиянием циркуляционных процессов над Беринговым морем и макрорельефа местности. Влияние Охотского моря по сравнению с этими факторами незначительно [5]. У подножий вулканов (до высот 900–1000 м) климат определяется теми же факторами, что и в долине р. Камчатка. На высотах более 1000 м местные климатические особенности размываются и господствует общая циркуляция атмосферы. На уровне границы питания ледников холодный сезон длится 9–10 месяцев — с начала сентября до первой половины мая. Толщина снежного покрова превышает 2 м, особенно на высотах 1600–1800 м. На ледниках в результате метелевого переноса и активной лавинной деятельности толщина сезонного снежного покрова превышает 4 м. Годовые суммы осадков изменяются в пределах 1000–2000 мм. Тёплый период выше 3000 м длится меньше месяца. Положительные среднесуточные температуры относительно постоянно держатся во второй половине июля [6].

Вулканический рельеф играет большую роль в распределении снежного покрова и развитии современного оледенения Ключевской группы вулканов. В отрицательных формах рельефа (кратеры, кальдеры, барранкосы) снежный покров интенсивно накапливается, а с вершин и выпуклых частей склонов вулканических построек он, как правило, сдувается ветрами. На морфологию современного оледенения района решающее влияние оказывают форма и степень разрушенности вулканических построек [3]. Присутствуют морфологические типы ледников, характерные для вулканических областей, — ледники барранкосов, кальдерно-долинные, кальдерные, ледяной пояс и ледники обвальных цирков [1]. Кроме того, встречаются и более редкие морфологические типы: ледяная шапка, перемётно-долинный и ледники подножий. В пределах Ключевской группы вулканов ледники отсутствуют только на самом невысоком вулкане — Малая Удина (см. рис. 1).

Влияние вулканической активности на ледники весьма разнопланово. Во время извержений вулканов, когда часть вулканической постройки разрушается, может произойти *механическое уничтожение значительной части ледников*. Например, во время Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. в результате

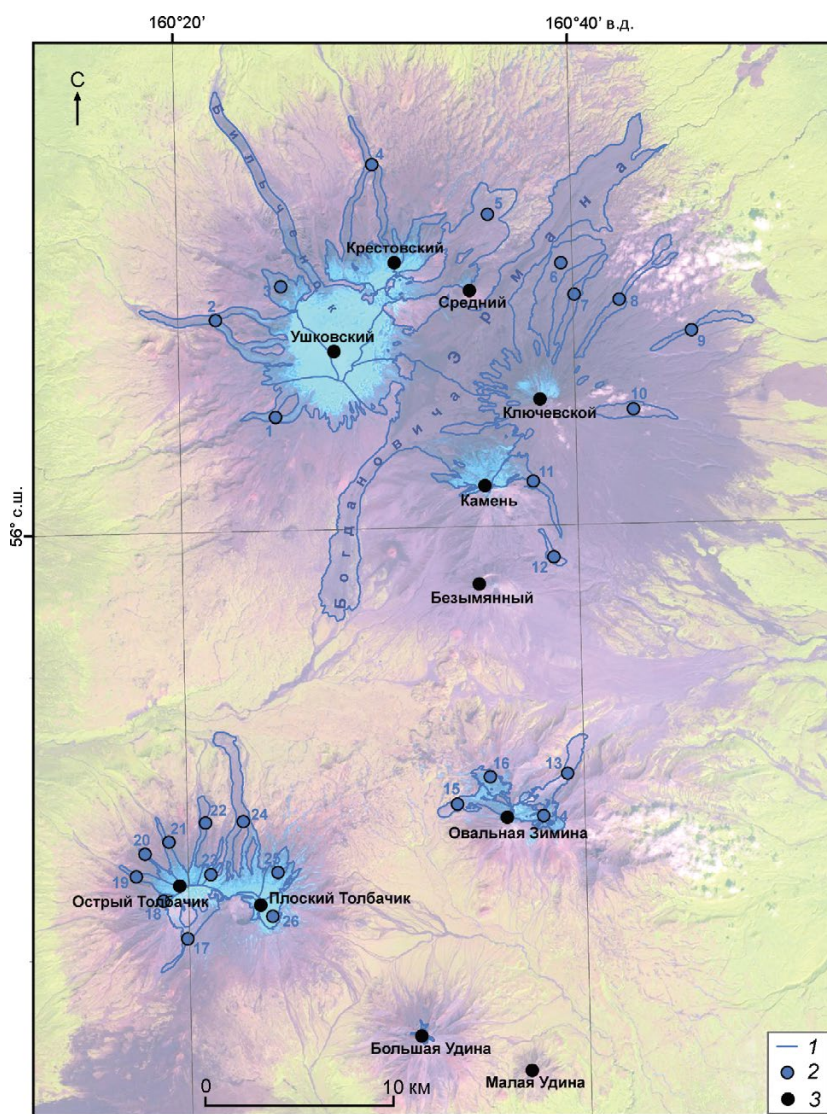


Рис. 1. Ключевская группа вулканов:

1 – границы ледников; 2 – ледники; 3 – вулканы. Ледники: 1 – Козыревский, Kozirevsky (№ 159); 2 – Ушковский, Ushkovsky (№ 160); 3 – № 161; 4 – Эульченко, Eulchenok (№ 163); 5 – Средний, Sredny (№ 164); 6 – Обвальный, Obvalny (нет в Каталоге, Catalog no); 7 – Влодавца, Vlodavtsa (№ 166); 8 – Сопочный, Sopochny (№ 167); 9 – Келля, Kellya (№ 168); 10 – Пийпа, Piipa (№ 169); 11 – Шмидта, Shmidta (№ 172); 12 – Каменский, Kamensky (№ 173); 13 – Жёлтый, Shelty (№ 174); 14 – № 144; 15 – Попкова, Popkova (№ 145); 16 – № 146; 17 – Черемошный, Cheremoshny (№ 147); 18 – № 149; 19 – Капелька, Kapel'ka (№ 150); 20 – Даечный, Daechny (№ 151); 21 – Виноградова, Vinogradova (№ 152); 22 – Будникова, Budnikova (№ 153); 23 – Бараний, Barany (№ 154); 24 – Института вулканологии, Institute of Vulcanology (№ 155); 25 – № 156; 26 – Толбачинский, Tolbachinsky (№ 157)

Fig. 1. Kluchevskaya group of volcanoes.

1 – glaciers boundary; 2 – glaciers; 3 – volcanoes. The names of the glaciers with numbers 1–26 listed above

просадки и обрушения внутренней кальдеры вулкана Плоский Толбачик была уничтожена часть Толбачинского ледника. Его площадь в пределах границ кромки провала внутренней кальдеры сократилась с 1,54 до 0,5 км² [7]. При взрыве вулкана Безымянный в марте 1965 г. были уничтожены фирновые поля в вершинной части вулкана.

Большая часть ледниковых языков Ключевской группы вулканов забронирована слоем вулканогенного материала неодинаковой мощности, в разной степени предохраняющим поверхность льда от таяния. В подобных условиях большую роль в поверхностной абляции нижних частей ледников с низкой скоростью движения льда (несколько метров в год) играет термоэрозия. Особенно чётко она проявляется на ледниках северо-восточного и восточного склонов Ключевского

вулкана. Дополнительно отметим и обратный эффект влияния на баланс области абляции – захоронение снежников-перелетков на языке. Динамика ледовых толщ на склонах действующих вулканов зависит от эффектов сейсмической подготовки перед извержениями и сейсмической активности во время извержений. Под влиянием многочисленных слабых землетрясений из зоны «пассивных» льдов начинают продвигаться новые ледниковые языки в район активных центров на конусах побочных извержений.

Оледенение Ключевского вулкана отличается уникальным своеобразием [8, 9], динамической нестабильностью и большой изменчивостью [7]. В результате взаимодействия вулканизма с оледенением на Ключевском вулкане сформировался специфический вулcano-гляциальный комплекс,

в котором выделяются три гляциальных зоны. *Ледяной пояс* расположен в диапазоне высот от 4200 до 2400–3500 м (ниже всего на северном склоне, выше — на восточном). В этой зоне мощность льда с высоким содержанием пирокластического материала (до 40–50%) не превышает 50–60 м, а скорость его движения, несмотря на большую крутизну склонов (30–35°), составляет лишь несколько метров в год [10]. Ниже ледяного пояса находится *шлейф «пассивных» льдов*, спускающийся до 1900–2000 м и содержащий массивы «мёртвых» и погребённых льдов мощностью до 20–30 м [10]. Лёд в этой зоне остался в основном в результате отмирания ледниковых языков при смене русел их движения после латеральных извержений или уничтожения участков областей питания некоторых ледников лавовыми потоками из вершинного кратера. Содержание пирокластического материала во льду этой зоны в среднем составляет 8–10% (до 15–25%). Массивы льдов в данной зоне имеют лишь слабую тенденцию к наступанию. Ниже расположена *зона многолетнемерзлых пород*, спускающаяся до 800–900 м.

Частые терминальные и побочные извержения Ключевского вулкана в ледниковой зоне приводят к наращиванию на его склонах шлейфа «мёртвых» и погребённых льдов «блуждающими» ледниками (ледники, не имеющие постоянных каналов стока, меняющие русло движения и размеры под влиянием вулканических извержений [8]), к которым можно отнести ледники Влодавца, Сопочный, Келля и др. [10]. В свою очередь, при благоприятной сейсмовулканической обстановке в пределах зоны «пассивных» льдов формируются небольшие языки активных потоков льда, иногда спускающихся за пределы (до 1–2 км) данной зоны.

Данные и методы

В настоящей работе использованы: 1) участки снимков WorldView-2 (09.09.2013 и 20.07.2010) с пространственным разрешением в мультиспектральном режиме около 2 м; 2) участки снимков GeoEye-1 (04.07.2013, 01.07.2011 и два снимка от 23.07.2012) с пространственным разрешением в мультиспектральном режиме около 2 м; 3) ортопродукт на базе снимка ASTER (19.07.2012) с пространственным разрешением 15 м; 4) космический снимок Landsat (22.09.2000) с пространственным разрешением 15 м (панхроматический

канал); 5) космический снимок КН-9 (28.06.1975) с пространственным разрешением 6–9 м; 6) аэрофотоснимки (далее АФС) 1949, 1950, 1967 и 1984 гг. с пространственным разрешением 3–10 м; 7) цифровая модель рельефа (далее ЦМР) SRTM4; 8) данные Каталога ледников СССР (далее «Каталог»); 9) материалы наблюдений на гидрометеостанции (ГМС) Ключи (сайт ВНИИГМИ-МЦД: www.meteo.ru) за 1950–2015 гг.; 10) данные полевых наблюдений за 2000–2015 гг.

Покрытие района исследований современными космическими снимками, использованными в работе, представлено на рис. 2. По космическим снимкам WorldView-2, GeoEye-1 и ASTER выполнено дешифрирование границ ледников Ключевской группы вулканов. Оцифровка границ ледников проведена вручную. На основе полученных результатов созданы цифровые карты границ ледников в векторном формате в картографической проекции UTM Zone 57N WGS 1984. Полученные результаты применены для оценки изменений площади ледников с 1950-х годов до 2010–2015 гг. Для этого основным массивом исходной информации служили данные Каталога ледников СССР [1] и АФС 1949 г., охватывающие конечные части ледников Бильченков, Эульченков, Средний, Эрмана, Жёлтый, Попкова. Для фиксирования промежуточных положений фронтов ледников между 1949 и 2010–2015 гг. использованы АФС 1967 и 1984 гг., космические снимки КН-9 (1975 г.) и Landsat (2000 г.). В процессе дешифрирования дополнительно вели работу с данными полевых наблюдений 2000–2015 гг. (фотоматериалы, GPS-точки и треки, фиксирующие положение фронтов ледников).

Часть Каталога, охватывающая Ключевскую группу вулканов, составлялась по результатам анализа АФС 1949–1950 гг. и обработки крупномасштабных топографических карт, данным полевых наблюдений 1960–1965 гг. и литературным источникам [1]. При проведении ледоразделов на вулканах Толбачик, Ушковский и Овальная Зимины использовались данные обработки ЦМР SRTM4. Отметим, что ледоразделы в этой работе и в Каталоге проведены по-разному по ряду причин: 1) разные используемые материалы и методы их обработки; 2) изменения, произошедшие с ледниками со времени составления Каталога; 3) дешифровочные навыки исследователей. Вопрос возможной миграции ледоразделов в данном районе практически не исследован. Поскольку найти исходные материа-

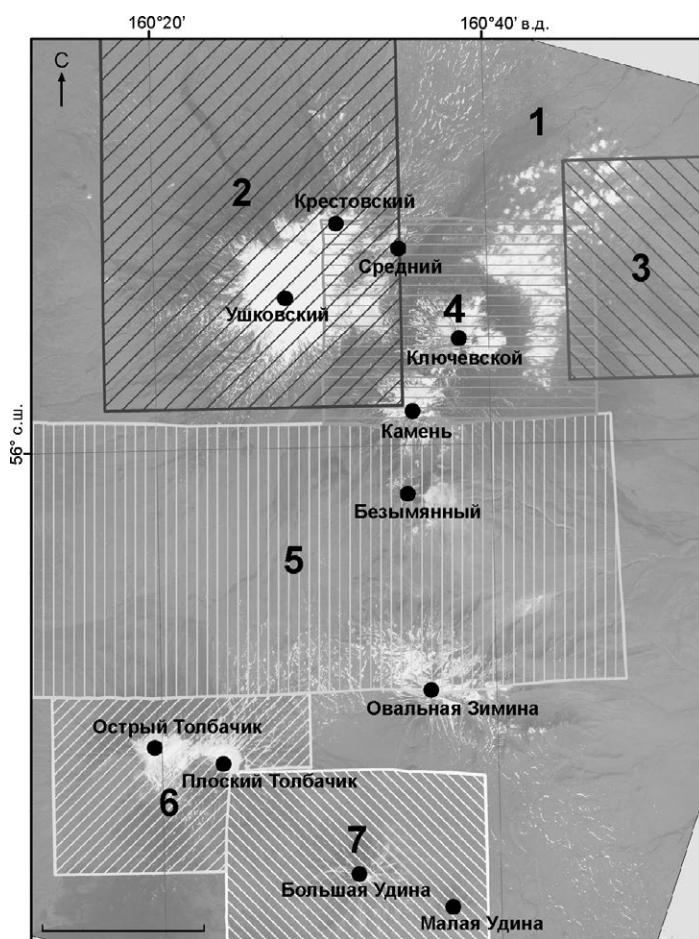


Рис. 2. Покрытие района исследований современными спутниковыми снимками:

1 – ASTER от 19.07.2012; 2 – WorldView-2 от 09.09.2013; 3 – WorldView-2 от 20.07.2010; 4 – GeoEye-1 от 23.07.2012; 5 – GeoEye-1 от 04.07.2013; 6 – GeoEye-1 от 01.09.2011; 7 – GeoEye-1 от 23.07.2012

Fig. 2. Floor area of research with modern satellite imagery:

1 – ASTER 19.07.2012; 2 – WorldView-2 09.09.2013; 3 – WorldView-2 20.07.2010; 4 – GeoEye-1 23.07.2012; 5 – GeoEye-1 04.07.2013; 6 – GeoEye-1 01.09.2011; 7 – GeoEye-1 23.07.2012

лы, использовавшиеся при составлении Каталога, не удалось, оценить различия в проведении ледоразделов невозможно. Поэтому в ряде случаев корректнее говорить об изменении оледенения вулкана (Толбачик, Плоская Дальняя) в целом, а не отдельных ледников, спускающихся с него.

Дешифрирование современных границ ледников по космическому снимку ASTER велось только на участках, не покрытых снимками высокого разрешения (см. рис. 2). Снимок Landsat применялся для дешифрирования фронтов ряда ледников по состоянию на 2000 г. Для этого выполнялась привязка отдельных участков снимка с расположенными на них языками ледников. С целью дешифрирования границ ледников по состоянию на 1975 г. часть космического снимка КН-9 на эту территорию была привязана и ортотрансформирована с использованием около 300 точек привязки в программном продукте ArcGis 9.3. Привязка проводилась к снимкам GeoEye-1, WorldView-2 и ASTER (на участках, не покрытых снимками высокого разрешения). Так как данный снимок сделан

в конце июня, уверенное дешифрирование границ ледников в областях их питания было затруднено из-за остатков сезонного снежного покрова. По этой причине дешифрировались на данном снимке лишь языковые части ледников ниже 2000–2100 м.

Проверка точности привязки современных спутниковых снимков высокого разрешения – сложная задача. Точность привязки снимков GeoEye-1 составляет 3 м при съёмке в нади́р, снимков WorldView-2 – 6,5 м. Для проверки привязки данных снимков по топографическим картам необходим доступ к картам масштабов около 1:6000 и 1:13 000 соответственно. Карт подобного масштаба на район исследований не существует. Из полевых материалов за разные годы было отобрано 10 точек со статичными объектами (получены GPS-навигаторами), уверенно опознаваемыми на космических снимках высокого разрешения (постройки и слияния рек). Измеренное отклонение положения объектов по данным измерений GPS-навигаторами от их положения на космических снимках составило 5–10 м. Проверка про-

пространственной привязки снимка ASTER проводилась по набору объектов, уверенно опознанных на нём и на снимках GeoEye-1 и WorldView-2. Вклад ошибки, обусловленной точностью пространственной привязки космических снимков GeoEye-1 и WorldView-2, оценивался путём построения буферной зоны вдоль границ ледников. Ширина буферной зоны равнялась удвоенной величине точности пространственной привязки данных снимков. Для участков границ ледников, оцифрованных по ортопродукту на базе снимка ASTER и привязанным к историческим космическим снимкам и АФС, ширина буферной зоны равнялась удвоенной величине разрешающей способности. Ошибки дешифрирования границ ледников, обусловленные наличием поверхностного моренного покрова, по аналогии с результатами выполненных ранее работ по ледникам других районов Камчатки и Алтая [11], приняты равными 1%. Учитывая сильную заморенность ледников района, для ледников площадью менее 0,5 км² данная величина принята равной 2%.

Оценить погрешности дешифрирования границ ледников, обусловленные субъективными факторами, крайне трудно. Фактически, это невозможно без полноценного исследования данного вопроса с анализом статистически значимой выборки результатов дешифрирования тестовых участков, выполненного разными экспертами.

Результаты

В процессе дешифрирования космических снимков идентифицировано 28 ледников из 31, присутствующего в Каталоге ледников СССР на территорию Ключевской группы вулканов. Не опознаны два ледника (№ 148 и 171). Дополнительно на Ключевском вулкане выделен крупный ледник ($7,51 \pm 0,26$ км² на 2012 г.), отсутствующий в Каталоге. На вулкане Большая Удина обнаружено четыре ледника площадью менее 0,1 км². Ледники такого размера в Каталоге ледников СССР на территории Камчатки не регистрировались. Кроме того, на склонах Ключевского вулкана по состоянию на 2012 г. выделено семь обособленных потоков льда площадью от 0,04 до $0,16 \pm 0,01$ км².

Ледник Ключевской (№ 170) как отдельное целостное образование не рассматривался по двум причинам. Во-первых, границы данного образования с расположенной ниже зоной «пассивных»

льдов крайне нечёткие. На многих участках переход из одной гляциальной зоны в другую плавный. Проведение линии их раздела в таких условиях без масштабных полевых исследований крайне субъективно. Во-вторых, в Каталоге ледников СССР приведённая площадь ледника Ключевской (15,3 км²) представляет собой площадь северо-восточной части ледяного пояса, относящейся к бассейнам рек Сопочная и Каменистая [1]. При этом части ледяного пояса, принадлежащие бассейнам рек Студеная (6,6 км²) и Сухая Хапица (1,1 км²), включены авторами Каталога в состав ледников Богдановича и № 171 соответственно. Фактически это не ледник в классическом понимании термина, а сложный вулcano-гляциальный комплекс, который служит источником подпитки ледников Ключевского вулкана. В таких условиях корректно идентифицировать границы ледяного пояса и сравнивать полученные данные с материалами Каталога не представляется возможным.

Результаты измерений площадей ледников и их изменения приведены в табл. 1. Общая площадь ледников, зарегистрированных в Каталоге [1], с 1950 по 2010–2015 гг., на первый взгляд, практически не изменилась (–0,7%), что требует пояснений. Так, весьма интересна динамика ледника *Эрмана* за прошедшие 65 лет (см. рис. 1). В ходе извержения Ключевского вулкана в 1945 г. по Крестовскому жёлобу на него сошёл вулcano-гляциальный оползень объёмом 0,3 км³ [12]. С тех пор ледник Эрмана непрерывно наступает (рис. 3). По данным работы [13], в 1945–1951 гг. его фронт продвинулся на 300 м. В середине 1960-х годов произошло раздвоение фронта ледника. Западная, более широкая часть фронта стала продвигаться по долине р. Сухая, а более узкая восточная – по долине р. Крутенькая. Изменения площади ледника Эрмана и продвижение его фронта за ряд временных интервалов даны в табл. 2. С 1949 по 2015 г. площадь фронтальной части ледника Эрмана увеличилась на $4,96 \pm 0,39$ км², а его фронт продвинулся на 3675 ± 15 м (до высоты 1035 м) по долине р. Сухая и примерно на 3480 ± 20 м (до высоты 950 ± 10 м) по долине р. Крутенькая. Разницу между увеличением площади ледника Эрмана по сравнению с Каталогом в целом и приращение его площади по фронту можно объяснить сочетанием двух факторов: первый – субъективный, заключается в различном проведении границ ледника в области

Таблица 1. Изменения площади ледников Ключевской группы вулканов с 1949–1950 [1] по 2010–2015 гг.

Номер ледника по КATALOGу	Название ледника	Морфологический тип ледника по КATALOGу	Площадь ледника по Ката-логу, км ²	Площадь ледника в 2010–2015 гг., км ²	Изменение площа-ди ледника с 1950 по 2010–2015 гг., км ² /%	Изменение площа-ди*** и положения фронта с 1975 по 2010–2015 гг., км ² /м	
144	№ 26	Ледяная шапка	0,9	0,81±0,07	–0,09/–10,0	–	
145	Попкова	Барранкосов	2,6	2,76±0,15	0,16/6,2	≈0	
146	№ 24	Подножий	4,3**	1,67±0,11	–2,63/–61,2	–	
147	Черемошный*	Обвальных цирков	4,4	4,43±0,12	0,03/0,7	–0,18±0,02/–690±10	
149	№ 28		0,5	0,27±0,07	–0,23/–46,0	–	
150	Капелька*		0,8	1,44±0,17	0,64/80,0	≈0/–55±10	
151	Даечный*		0,9	0,79±0,15	–0,11/–12,2	–	
152	Виноградова*		1,3	1,48±0,12	0,18/13,8	–0,06±0,04/–140±15	
153	Будникова*		1,4	1,73±0,05	0,33/23,6	–0,05±0,01/–240±10	
154	Бараний*		1,2	0,69±0,03	–0,51/–42,5	–	
155	Института вулканологии		6,2	8,69±0,21	2,49/40,2	≈0/±50±10	
156	№ 156	Кальдерный	1,9	2,64±0,07	0,74/38,9	–	
157	Толбачинский		6,8	2,39±0,06	–4,41/–64,9	–	
158	Богдановича		Перемётно-долинный и ледяной пояс	37,8	42,26±0,85	4,46/11,8	1,41±0,07/до 950±10
159	Козыревский		Кальдерно-долинный	3,9**	8,54±0,27	4,64/119	–
160	Ушковский			11,6	13,33±0,42	1,73/14,9	–0,57±0,06/–340±10
161	№ 23		Барранкосов	3,3	3,01±0,06	–0,29/–8,8	–
162	Бильченко		Кальдерно-долинный	21,8	19,72±0,5	–2,08/–9,5	–0,26±0,07/–300±10
163	Эульченко		Барранкосов	10,3	11,24±0,4	0,94/9,1	–0,04±0,03/330±10
164	Средний	Подножий	22,0**	17,19±0,53	–4,81/–21,9	–	
165	Эрмана	Перемётно-долинный	34,2	42,33±1,16	8,13/23,8	1,75±0,28/1950±15	
166	Влодавца		5,0**	2,29±0,07	–2,71/–54,2	0,23±0,03/500±10	
167	Сопочный		6,0**	3,24±0,1	–2,76/–46,0	0,19±0,08/95±10	
168	Келля		5,7**	1,79±0,1	–3,91/–68,6	–0,04±0,03/–25±10	
169	Пийпа	Барранкосов	4,3	2,48±0,05	–1,82/–42,3	–	
172	Шмидта		Долинный	3,4	3,16±0,09	–0,24/–7,1	–0,28±0,04/–1730±10
173	Каменский		Обвальных цирков [2]	0,7	0,74±0,02	0,04/5,7	0,05±0,01/170±10
174	Желтый			4,0	4,66±0,24	0,66/16,5	–0,08±0,03/–25±10
Всего			207,2	205,77±6,22	–1,43/–0,7	–	

*Данные названия не фигурируют в Каталоге ледников СССР. **Авторы считают площадь данных ледников в Каталоге некорректной. Из них только площадь ледника Козыревский существенно занижена. ***Изменение площади конечной (прифронтальной) части ледника. Отрицательные значения изменения положения фронта означают, что фронт ледника отступил, положительные – наступил.

его аккумуляции разными исследователями; второй – изменениями, произошедшими на леднике с 1950 г. под влиянием дополнительной аккумуляции льдонасыщенных пород оползня 1945 г.

Крупный оползень, сошедший во время извержения Ключевского вулкана в 1945 г., привёл к возникновению ледникового языка (условно назван «Обвальный»), спускающегося по северному склону вулкана между ледниками Эрмана и Влодавца (см. рис. 1). Данный ледник не был идентифицирован во время составления Каталога. Это обусловлено тем, что в конце 1940-х – начале 1950-х годов он вместе с прилегающими участками склона был перекрыт обвальными массами. Возмож-

но, до схода оползня ледниковый язык в данном месте не существовал. Однако, судя по схеме оледенения района в Каталоге [1], значительная часть территории современной области питания этого ледника была включена в состав ледника Эрмана. По состоянию на 2012 г. площадь ледника составляла 7,51±0,26 км². Вероятно, данный ледниковый язык, как и ледник Эрмана, наступал непрерывно с 1945 г. С 1975 г. его площадь по фронту возросла на 2,87±0,22 км², а длина – на 1800–1850 м.

Ледник Влодавца, спускающийся по северному склону Ключевского вулкана, наступал в 1967–1968 гг. после побочного прорыва имени Б.И. Пийпа. По данным, опубликованным в рабо-

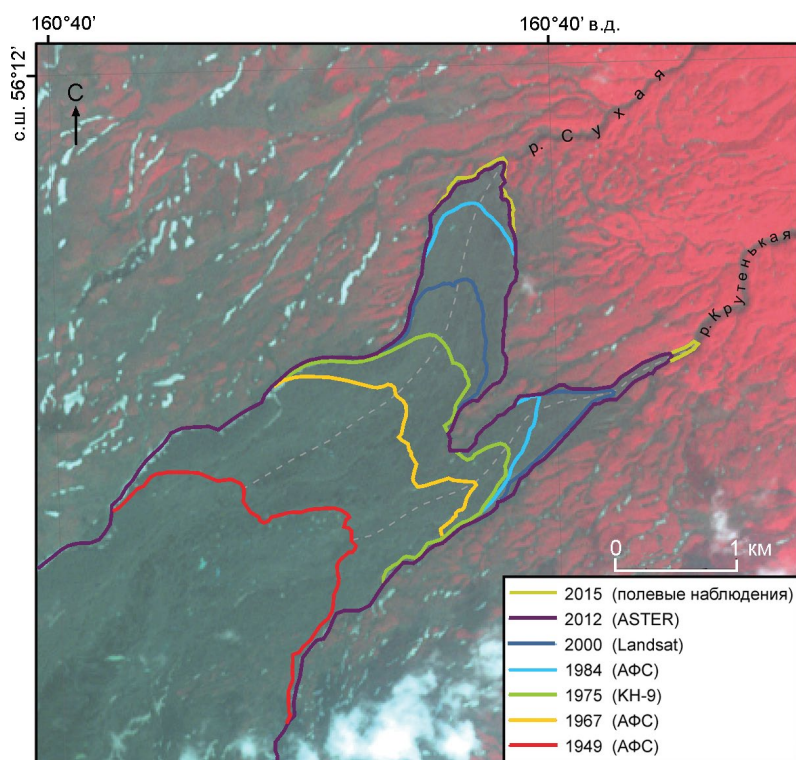


Рис. 3. Продвижение фронта ледника Эрмана в 1949–2015 гг.

Fig. 3. Advancing of the Erman Glacier front in 1949–2015

Таблица 2. Изменение площади ледника Эрмана и продвижение его фронта за 1949–2015 гг.

Годы	Приращение площади ледника по фронту, км ²	Наступание фронта, м	
		по долине р. Сухая	по долине р. Крутецкая
1949–1967	2,37±0,19	1480±15	1130±15
1967–1975	0,84±0,06	590±15	400±15
1975–1984	0,56±0,09	515±15	385±15
1984–2000	0,86±0,16	655±20	660±20
2000–2012	0,29±0,15	400±30	670±30
2012–2015	0,04±0,04	35±25	235±30
1949–2015	4,96±0,39	3675±15	3480±20

те [10], его площадь во время данной подвижки увеличилась с 2,6 км² (площадь по КATALOGу была переоценена) до 3,1 км², а язык продвинулся на 2,2 км. С 1975 по 2012 г. площадь ледника во фронтальной части увеличилась на 0,23±0,03 км², а продвижение фронта составило около 500 м. При этом общая площадь ледника сократилась до 2,29±0,07 км² за счёт перемещения льда из верховьев ледника и трансформации её отдельных участков в «пассивные» льды. Подобные преобразования характерны и для других «блуждающих» ледников вулкана.

По данным авторов работы [10], площадь ледника *Сопочный* на начало 1950-х годов составляла 3,6 км² (данные КATALOGа были переоценены).

В 1953 г. у фронта ледника произошли латеральное извержение, а затем подвижка ледника; его язык с двух сторон обошёл образовавшийся шлаковый конус и увеличил свою площадь на 1 км² за три года (до 4,6 км²), пройдя при этом около 2 км. Очередную подвижку ледника *Сопочный* вызвало прохождение рядом с его фронтом лавового потока прорыва Пийпа (1966 г.). За 1967 г. фронт ледника продвинулся на 125–130 м [14]. В дальнейшем наступание фронта левого языка продолжилось. С 16 сентября 1970 г. по 20 сентября 1971 г. оно составило 20 м. Медленное наступание ледника установлено и в дальнейшем. С 1975 по 2010 г. его фронт продвинулся на 95±10 м, площадь конечной части ледника возросла на 0,19±0,08 км². Общее сокращение площади ледника по сравнению с данными работ [10, 14], вероятно, произошло за счёт трансформации отдельных участков верхней части ледника в «пассивные» льды.

Площадь ледника *Келля* в середине XX в. составляла 4,2 км² (данные КATALOGа были переоценены), а длина его северного языка достигала 8 км [10]. В 1946–1950 гг. произошла подвижка южного языка, по-видимому, спровоцированная терминальным извержением 1944–1945 гг. В результате южный язык в виде узкого потока льда спустился до высоты 1500 м, а его длина достиг-

ла 5,5 км. В дальнейшем исследователи отмечали, что средняя часть северного языка ледника Келля стала преобразовываться в массив «мёртвых» льдов, а небольшое извержение 1980 г. (так называемый «Прорыв им. 8 Марта») фактически завершило отчленение этой части ледника. К середине 1980-х годов северный язык ледника Келля сократился в длину на 4,6 км. Во время очередного побочного извержения Ключевского вулкана в марте–июне 1983 г. (Прорыв «Предсказанный») значительная часть области питания ледника и его южного языка была уничтожена [15]. По состоянию на 1983 г. площадь ледника Келля не превышала 2,1 км², а его максимальная длина составляла 3,4 км [10]. По данным дешифрирования космических снимков 1975 и 2010 гг., фронт ледника отступил всего на 20–30 м, однако его площадь за 1987–2010 гг. сократилась до $1,79 \pm 0,1$ км². Поверхность ледника изрезана термоэрозией. Можно предположить, что данный «блуждающий» ледник постепенно отмирает и преобразуется в массивы «пассивных» и «мёртвых» льдов.

Первая наблюдаемая подвижка «многоярусного» ледника *Шмидта* началась в 1978 г. во время сильного извержения Ключевского вулкана [16]. В 1980-х годах наблюдалось наступание его активного фронта, который надвигался на «мёртвые» льды, оставшиеся от предыдущей подвижки [10]. В 1987 г. в области питания ледника произошло побочное извержение Ключевского вулкана. Тело ледника на уровне границы питания оказалось вскрыто на всю толщину (около 80–100 м), а расположенная ниже наиболее узкая часть ледникового языка в значительной мере была размыта лахарами. С 2009 г. наблюдается наступание ледника по его предыдущей поверхности, оставшейся от подвижки 1978–1987 гг. [17]. Очевидно, что новая подвижка ледника *Шмидта* связана с мощными вершинными извержениями Ключевского вулкана 2005–2010 гг. [16] и позднее.

Ледник Богдановича в период наблюдений также наступал. Из-за большой ширины фронта (около 2 км) наступание его различных участков в разные временные периоды происходило неравномерно. За 1975–2000 гг. максимальное его продвижение в восточной части фронта составило 760–780 м; за 2000–2013 гг. данная часть фронта ледника продвинулась ещё на 170–190 м.

Кальдерно-долинный ледник *Бильченек*, спускающийся по северному склону Ушковского

вулкана, — один из наиболее изученных ледников района и крупнейший в России пульсирующий ледник. По данным [18], во второй половине XX в. зафиксировано две его подвижки. В период между 1949 г. и началом первой подвижки (1959–1960), по оценкам работы [7], фронт ледника отступил примерно на 0,5 км. По привязанному АФС 1984 г. было дешифрировано приблизительное положение границы нижней части ледника в конце первой подвижки. За 1959–1960 гг. фронт ледника продвинулся на 560–570 м относительно своего положения в 1949 г. до высот 620–630 м. Учитывая положение конца ледника на АФС 1949 г. (рис. 4) и информацию о его отступании примерно на 0,5 км в 1949–1959 гг., мы оценили продвижение фронта во время подвижки 1959–1960 гг. в 1050–1150 м. После завершения подвижки ледник стал быстро отступать. К 1975 г. его фронт (определён по снимку КН-9) отступил на 1150 ± 30 м относительно своего положения в 1960 г., а площадь конечной части языка сократилась на $1,4 \pm 0,08$ км². По данным работы [18], в ходе второй, меньшей по масштабу подвижки 1982–1984 гг. фронт ледника продвинулся на 700–800 м, т.е., судя по положению фронта ледника в 1975 (снимок КН-9) и 1984 гг. (АФС), за 1975–1982 гг. отступление составило 750–850 м. С 1984 по 2009 г. (полевые данные) фронт ледника отступил ещё на 320–330 м. После 2009 г. тенденция к отступанию не наблюдалась. За 2009–2013 гг. фронт ледника продвинулся на 60 ± 5 м. Полевые наблюдения в августе 2015 г. не выявили изменений в положении фронта ледника, расположенного на высоте 740 ± 10 м, относительно 2013 г.

В число ледников, площадь по Каталогу которых по нашему мнению существенно завышена, входит ледник *Средний* (№ 164). В результате дешифрирования на современных космических снимках в пределах границ ледника установлены крупные выходы коренных пород (суммарной площадью около 3,5 км²), не отмеченные на схеме Каталога. Сравнение результатов дешифрирования границ ледника на АФС (21.10.1984) и на современных снимках показало, что его фронт на большей части квазистационарен. Были обнаружены участки его отступания на 20–30 м и наступания на 20–40 м, что близко к погрешности измерений, обусловленной точностью исходных материалов и погрешностями их привязки.

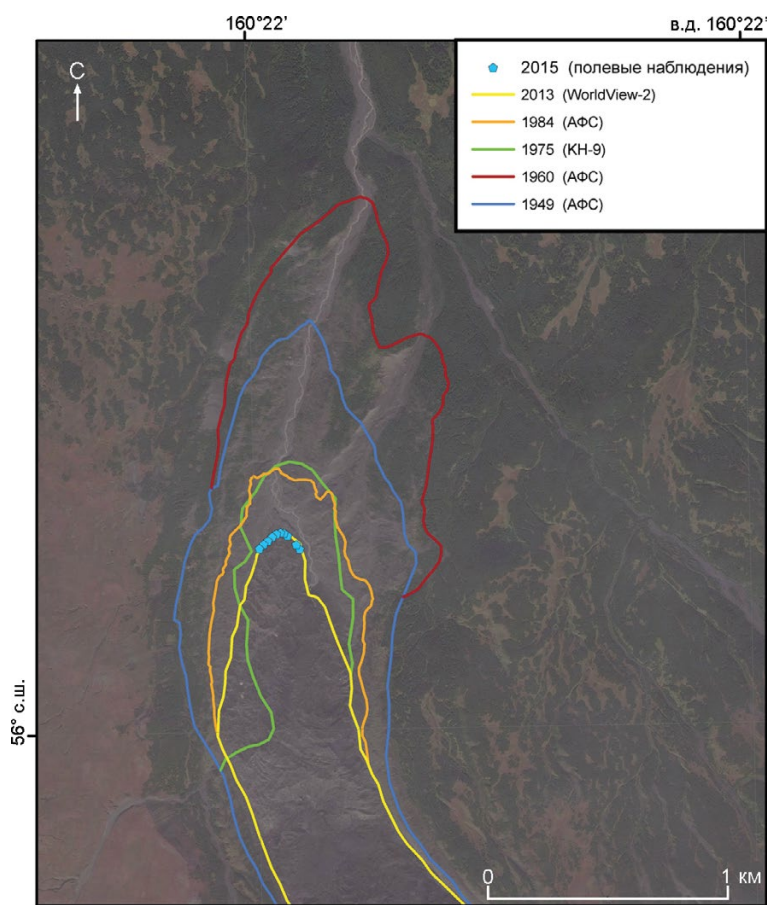


Рис. 4. Изменения положения фронта ледника Бильченок в 1949–2015 гг.

Fig. 4. Changes of Bilchenok Glacier front in 1949–2015

Площадь по Каталогу ледника *Козыревский* (№ 159), напротив, занижена. Судя по схеме Каталога, из его состава были исключены обширные фирновые поля на южном склоне вулкана Ушковский. Частично разница в площадях обусловлена различным проведением ледоразделов с соседними ледниками в Каталоге и в данном исследовании.

Ледник Эульченок, спускающийся на север с Крестовского вулкана, наступал во второй половине XX в. Анализ имеющихся материалов показал, что с 1949 (АФС) по 1975 г. (снимок КН-9) фронт ледника продвинулся на 380–390 м. С 1975 по 2000 г. (снимок Landsat) он прошёл ещё около 330 ± 10 м. После этого, по данным дешифрирования космического снимка 2013 г. (WorldView-2) и полевым наблюдениям августа 2015 г., фронт ледника Эульченок был практически стационарен и находился на высоте около 1150 м. При этом по мере продвижения ледникового языка вниз по долине он сужался.

При оценке изменений площадей ледников, расположенных на вулкане Толбачик, возникает проблема разного проведения протяжённых ле-

доразделов в Каталоге и данной работе. Исходные материалы, использовавшиеся при создании части Каталога на район исследований, недоступны. Поэтому целесообразно рассматривать изменение площади оледенения вулкана Толбачик в целом и колебания фронтов ледников, спускающихся с него. Площадь оледенения вулкана Толбачик за 1950–2011 гг. сократилась на $0,85 \text{ км}^2$ (3,3%), до $24,55 \pm 1,04 \text{ км}^2$. Известна подвижка ледника *Черемошный* (№ 147), начавшаяся во время Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. В дальнейшем наступание этого ледника подтвердилось полевыми данными 1978 и 1983 гг. В настоящее время ледник отступает. К 2011 г. его фронт относительно положения в 1975 г. отступил на 680–700 м. Положение фронта ледника *Института вулканологии* с 1975 г. изменилось мало. На различных участках выявлены его наступание и отступление в пределах 50 ± 10 м.

Ледник Жёлтый, спускающийся с вулкана Овальная Зими́на на север (см. рис. 1), после взрыва вулкана Безымянного в 1956 г. был перекрыт мощным чехлом пирокластического мате-

риала. По данным работы [3], после этого ледник незначительно отступил, а поверхность его языка не претерпела существенных изменений. Анализ результатов дешифрирования АФС 1950 г. и снимка КН-9 показал, что фронт ледника находится в квазистационарном состоянии со слабой тенденцией к отступанию. В 1950–1975 гг. его положение на разных участках изменялось в пределах $\pm 5 \div 15$ м, т.е. в пределах погрешностей измерений. По данным работы [19], в 1978–1980 гг. фронт активизации ледника продвинулся на 10–20 м. Анализ результатов дешифрирования снимков КН-9 и GeoEye-1 показал, что с 1975 по 2013 г. фронт ледника Жёлтый отступил примерно на 20–30 м, а его фронт активизации продвинулся на 200–230 м. Разница площадей ледника в Каталоге и в данной работе, вероятно, в значительной степени обусловлена разным проведением его границ в области аккумуляции.

Фронт ледника *Попкова*, спускающегося на запад с вулкана Овальная Зими́на, в период 1950–1975 гг. продвинулся примерно на 80 м. В дальнейшем его положение менялось мало. Разница в положении различных участков фронта между 1975 и 2013 гг. находится в пределах $\pm 10 \div 20$ м.

При анализе данных Каталога, публикаций, а также результатов дешифрирования современных космических снимков и разновременных АФС были сделаны выводы о некорректности площадей ряда ледников в Каталоге. Мы попытались оценить изменение площади оледенения Ключевской группы вулканов с учётом обоснованных поправок площадей четырёх ледников, представленных в Каталоге, двух ледников, не идентифицированных на современных космических снимках, и возникшего после 1945 г. ледника «Обваль́ный». Для этого в данные 1950 г. были внесены следующие поправки: 1) площадь ледника Влодавца принята равной $2,6 \text{ км}^2$ (переоценка из работы [10]); 2) площадь ледника Сопочный — равной $3,6 \text{ км}^2$ (переоценка из работы [10]); 3) площадь ледника Келля — равной $4,2 \text{ км}^2$ (переоценка из работы [10]); 4) площадь ледника Средний — равной $18,5 \text{ км}^2$ (было вычтено $3,5 \text{ км}^2$ площади крупных выходов коренных пород, не учтённых в Каталоге); 5) введены в расчёты площади ледников № 148 ($0,7 \text{ км}^2$) и № 171 ($2,0 \text{ км}^2$), которые не были опознаны на современных космических снимках. В современные данные внесена одна правка — добавлена площадь двух участков

ледника «Обваль́ный»: участок прироста языка в 1975–2012 гг. ($2,87 \pm 0,22 \text{ км}^2$) и участок языка между границей ледника в 1975 г. и границей завала 1945 г. ($0,15 \pm 0,02 \text{ км}^2$). Сравнение не учитывало: ледяной пояс Ключевского вулкана; ледники площадью менее $0,1 \text{ км}^2$ (такие ледники не учитывались в Каталоге на территорию Камчатки); некорректность площадей ледников Козыревский и № 146 в Каталоге, заново оценить которые мы не можем из-за отсутствия исходных материалов. В результате переоценки площадь оледенения района (за исключением ледника № 170) на 1950 г. составила $200,1 \text{ км}^2$, современная — $208,8 \pm 6,44 \text{ км}^2$. Таким образом, с 1950 по 2010–2015 гг. площадь оледенения Ключевской группы вулканов увеличилась на 4,3%. Вероятно, данная цифра точнее характеризует изменения, произошедшие с оледенением района за период исследований.

Для анализа климатических изменений проанализированы данные наблюдений ближайшей к району исследований ГМС Ключи с 1950 по 2015 г. Изучены средние летние (с июня по август) температуры приземного воздуха за 1950–2015 гг. и суммы твёрдых осадков с октября по май (период аккумуляции на ледниках района) за 1966–2015 гг. Летние температуры воздуха в 1989–2015 гг. по сравнению с 1951–1980 гг. повысились на $1,2^\circ\text{C}$ (рис. 5). Сумма твёрдых осадков в 1989–2015 гг. по сравнению с 1966–1980 гг. сократилась на 2,2%. Фактически изменение площади оледенения района исследований не соответствует изменениям основных климатических факторов. За сопоставимый период с 1950 по 2010–2013 гг. площадь оледенения массива Алней-Чашаконджа, расположенного примерно в 60 км северо-западнее Ключевской группы вулканов, сократилась на 19,2% [11]. Очевидно, что разница в изменениях оледенения этих близко расположенных районов Камчатки обусловлена прежде всего наличием современной вулканической активности в пределах Ключевской группы вулканов и её отсутствием на массиве Алней-Чашаконджа.

Заключение

Согласно результатам прямого сравнения с данными Каталога, оледенение Ключевской группы вулканов с 1950 по 2010–2015 гг. практически не изменилось. Сокращение площади ледни-

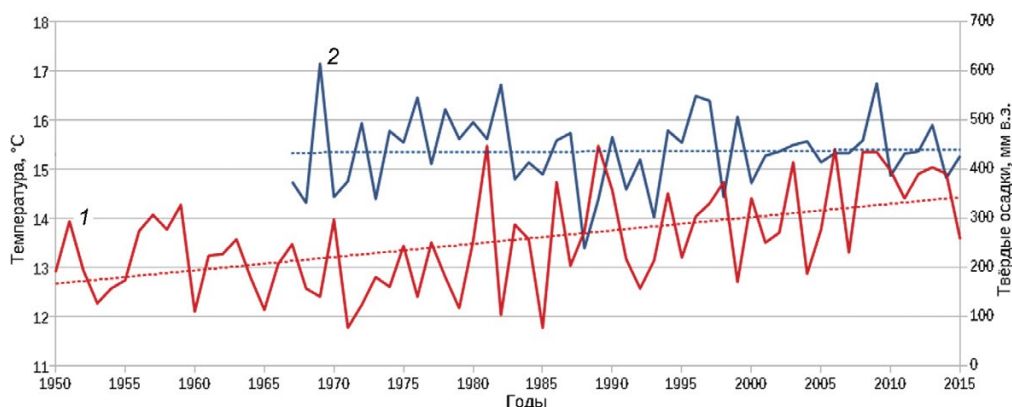


Рис. 5. Многолетний ход средней летней температуры воздуха (1) и сумм осадков с октября по май (2) на ГМС Ключи

Fig. 5. Average summer temperature (1) and precipitation sum from October to May (2) at the meteorological station Klyuchi

ков по сравнению с данными Каталога составило 0,7%. Для учёта очевидного завышения площадей ряда ледников в Каталоге и формирования после 1945 г. крупного ледника «Обвальный» был сделан перерасчёт, который показал рост площади оледенения района за период исследований на 4,3% (до $208,8 \pm 6,44$ км²). Под воздействием активного вулканизма конфигурация границ ледников Ключевского вулкана изменяется не только в их языковых частях, но и в областях аккумуляции. На его склонах наблюдается постепенное отмирание ряда языков «блуждающих» ледников. Параллельно этому в пределах «ледяного» пояса формируются новые потоки активного льда. Все известные подвижки ледников этого вулкана связаны с его

извержениями. Основными причинами отмирания языков «блуждающих» ледников служат сброс льда с последующим преобразованием верхних частей ледниковых языков в массивы «пассивных» льдов и уничтожение участков областей аккумуляции во время извержений Ключевского вулкана.

Фронты большинства ледников, расположенных на других вулканах района, в настоящее время находятся в квазистационарном состоянии благодаря мощному моренному покрову, предохраняющему ледниковые языки от поверхностной абляции. Взаимодействие современного вулканизма и оледенения в данном районе способствует сохранению и развитию ледников, несмотря на ухудшение климатических условий их существования.

Литература

1. Виноградов В.Н. Каталог ледников СССР. Т. 20. Ч. 2–4. 1968. 75 с.
2. Богданович К.И. Очерк деятельности Охотско-Камчатской горной экспедиции 1895–1898 гг. // Изв. РГО. 1899. Т. 35. Вып. 6. С. 549–600.
3. Виноградов В.Н. Современное оледенение районов активного вулканизма. М.: Наука, 1975. 103 с.
4. Кондратюк В.И. Климат Камчатки. М.: Гидрометеоиздат, 1974. 204 с.
5. Глазырин Г.Е., Муравьев Я.Д., Виноградов В.Н. О климатическом фоне оледенения Камчатки // Гляциол. исследования. 1985. № 27. С. 51–66.
6. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира: Т. 1 / Гл. ред. В.М. Котляков. М.: изд. РАН, 1997. 392 с.
7. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Изменчивость современных ледников вулканических районов Камчатки // МГИ. 1982. Вып. 42. С. 164–170.

References

1. Vinogradov V.N. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 20. Parts 2–4. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968: 76 p. [In Russian].
2. Bogdanovich K.I. Essay of activities the Okhotsk–Kamchatka mountain expedition in 1895–1898. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva*. Proc. of the Russian Geographical Society. 1899, 35 (6): 549–600. [In Russian].
3. Vinogradov V.N. *Sovremennor oledenenie rayonov aktivnogo vulkanizma*. Modern glaciation of the regions of active volcanism. Moscow: Nauka, 1975: 103 p. [In Russian].
4. Kondratyuk V.I. *Klimat Kamchatki*. Kamchatka climate. Moscow: Hydrometeoizdat, 1974: 204 p. [In Russian].
5. Grazyrin G.E., Muravyev Ya.D., Vinogradov V.N. On the climatic background of Kamchatka's glaciation. *Glyatsilogicheskie issledovaniya*. Glaciological studies. № 27. Moscow: Nauka, 1985: 51–66. [In Russian].
6. World Atlas of Snow and Ice Resources. V. 1. / Editor V.M. Kotlyakov. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p.

8. Калесник С.В. Горные ледниковые районы СССР. Л.-М.: Гидрометеиздат, 1937. 184 с.
9. Конради С.А., Келль Н.Г. Геологический отдел Камчатской экспедиции 1908–1911 гг. // Изв. РГО. 1925. Т. 57. Вып. 1. С. 3–32.
10. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Особенности развития ледников в условиях активного вулканизма // МГИ. 1989. Вып. 66. С. 93–99.
11. Муравьев А.Я. Изменение размеров ледников Кроноцкого полуострова и массива Алней-Чашаконджа на Камчатке во второй половине XX – начале XXI в. // Лёд и Снег. 2014. № 2 (126). С. 22–28.
12. Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н. Прогнозная оценка динамики ледниковых масс в вулканотектонических желобах Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 43–53.
13. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаборатории вулканологии. Вып. 11. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 310 с.
14. Андреев В.И., Виноградов В.Н., Кирсанов И.Т. Изменение положения ледников северного склона вулкана Ключевского // Гляциол. исследования. 1976. № 25. С. 45–50.
15. 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.
16. Муравьев Я.Д., Муравьев А.Я., Осипова Г.Б. Ледниковые подвижки в районах активного вулканизма // Тезисы XV гляциол. симпозиума. Казань, 2010. С. 23.
17. 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.
18. Муравьев Я.Д., Цветков Д.Г., Муравьев А.Я., Осипова Г.Б. Динамика пульсирующего ледника Бильченок в Ключевской группе вулканов // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 31–39.
19. Отчет Института вулканологии АН СССР «Динамика современного оледенения и взаимодействие с вулканизмом» / Руководитель темы и отв. исполнитель В.Н. Виноградов. Петропавловск-Камчатский, 1982. 333 с.
7. Vinogradov V.N., Muraviev Ya.D. Variability of the present-day glaciers in volcanic regions of Kamchatka. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1982, 42: 164–170. [In Russian].
8. Kalesnik S.V. *Gornye lednikovye rayony SSSR*. Mountain glacier regions of the USSR. Leningrad–Moscow: Hydrometeoizdat, 1937: 184 p. [In Russian].
9. Konradi S.A., Kell N.G. Geological department of the Kamchatka expedition of 1908–1911. *Izvestiya RGO*. Proc. of the Russian Geographical Society. 1925, 57 (1): 3–32. [In Russian].
10. Vinogradov V.N., Muraviev Ya.D. Peculiarities of glaciers evolution in the conditions of active volcanism. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1989, 66: 93–99. [In Russian].
11. Muraviev A.Ya. Glacier size changes in Kronotsky Peninsula and Alney-Chashakondzha Massif, Kamchatka Peninsula in the second half of XX century and the beginning of XXI century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 2 (126): 22–28. [In Russian].
12. Muravyev Ya.D., Salamatina A.N. Predictive estimate of ice mass dynamics in volcano-tectonic valleys of the Klyuchevskoy volcano. *Vulkanologiya i seysmologiya*. Volcanology and Seismology. 1993, 4: 43–53. [In Russian].
13. Piypp B.I. *Klyuchevskaya sopka i yeye izverzheniya v 1944–1945 gg. i v proshlom*. Klyuchevskaya Sopka and its eruptions in 1944–1945 and in the past. Proc. of the Laboratory of Volcanology. Issue 11. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1956: 310 p. [In Russian].
14. Andreiev V.A., Vinogradov V.N., Kirsanov I.T. Change of the glacier position on the northern slope of Kluchevskoy volcano. Glaciological studies. № 25. Moscow: Nauka, 1976: 45–50. [In Russian].
15. Vinogradov V.N., Muraviev Ya.D. Lava and ice interaction at the Klyuchevskoy volcano during the 1983 eruption. Volcanology and Seismology. 1985, 1: 29–46. [In Russian].
16. Muraviev Ya.D., Muraviev A.Ya., Osipova G.B. Glacial surges in the areas of active volcanism. *Tezisy XV glyatsiologicheskogo simpoziuma*. Abstracts of the XV Glaciological Symposium. Kazan, 2010: 23. [In Russian].
17. Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Muraviev A.Y., Rototaeva O.V., Nikitin S.A., Zverkova N.M. *Sovremennye izmeneniya lednikov gornyykh rayonov Rossii*. Recent glacier changes in mountain regions of Russia. Moscow: KMK Scientific Press, 2015: 288 p. [In Russian].
18. Muraviev Ya.D., Tsvetkov D.G., Muraviev A.Ya., Osipova G.B. Dynamics of the Bilchenok surging glacier in the Klyuchevskaya volcano group. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 2 (118): 31–39. [In Russian].
19. *Otchot Instituta vulkanologii AN SSSR «Dinamika sovremennogo oledneniya i vzaimodeistvie s vulkanizmom»*. Report of the Institute of Volcanology, USSR Academy of Sciences «Dynamics of modern glaciation and interaction with volcanism». Petropavlovsk-Kamchatsky, 1982: 333 p. [In Russian].