

## Динамика пульсирующего ледника Бильченок в Ключевской группе вулканов

© 2012 г. Я.Д. Муравьев<sup>1</sup>, Д.Г. Цветков<sup>2</sup>, А.Я. Муравьев<sup>2</sup>, Г.Б. Осипова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский; <sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва  
*murid@kscnet.ru*

Статья принята к печати 7 сентября 2011 г.

Вулканическая деятельность, движение льда, морфология поверхности, подвижка, пульсирующий ледник, фронт активизации.  
 Front of growing activity, glacier surge, ice movement, surface morphology, surging glacier, volcanic activity.

Исследована эволюция пульсирующего ледника Бильченок в Ключевской группе вулканов (Камчатка) с конца XIX в. по настоящее время. После отступления в начале XX в. ледник активизировался и в конце 1940-х годов стал наступать. Мощная подвижка ледника произошла в 1959–1960 гг., когда его язык продвинулся на 2 км и спустился до высоты 615–630 м в берёзовый лес. Масштабы следующей подвижки ледника (1982–1984 гг.) были менее значительны. Объём перенесённой массы составил около 35–40 млн. т, что в 3,5 раза меньше, чем при подвижке 1959–1960 гг. Не исключено, что начало этой подвижки и характер её развития в значительной мере связаны с усилением сейсмической активности. В настоящее время началась очередная подвижка ледника.

### Введение

Исследование динамики и режима пульсирующего ледника, особенно в стадию подвижки, — событие всё ещё весьма редкое. Регулярные исследования поставлены лишь на двух ледниках — Медвежий (Памир) [8 и др.] и Вариагейтид (Аляска) [16, 18, 20 и др.]. Вместе с тем для более полного понимания процессов, происходящих в ледниковом теле, и критического анализа предлагаемых теорией механизмов сёрджей данные по пульсациям ледников, находящихся в разных геологических и климатических обстановках, особенно важны. Результаты наблюдений на пульсирующем леднике, режим которого обусловлен не только внутренними динамическими причинами, но вулканической деятельностью, — наиболее интересны. Отметим, что нарушение динамического режима пульсирующего ледника Колка на Кавказе в результате воздействия комплекса внешних факторов, в том числе и активизации вулканических процессов, привело к выбросу ледника в 2002 г. и катастрофическим последствиям с человеческими жертвами [15].

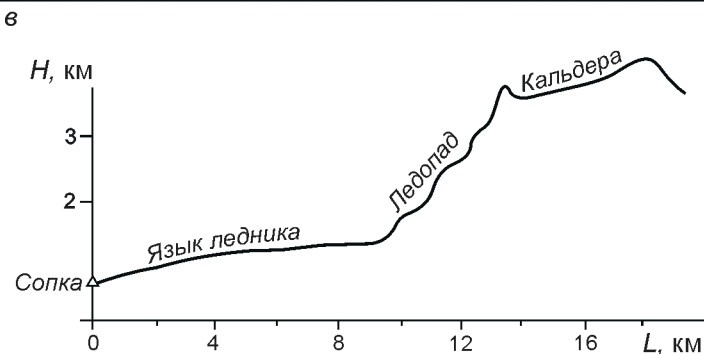
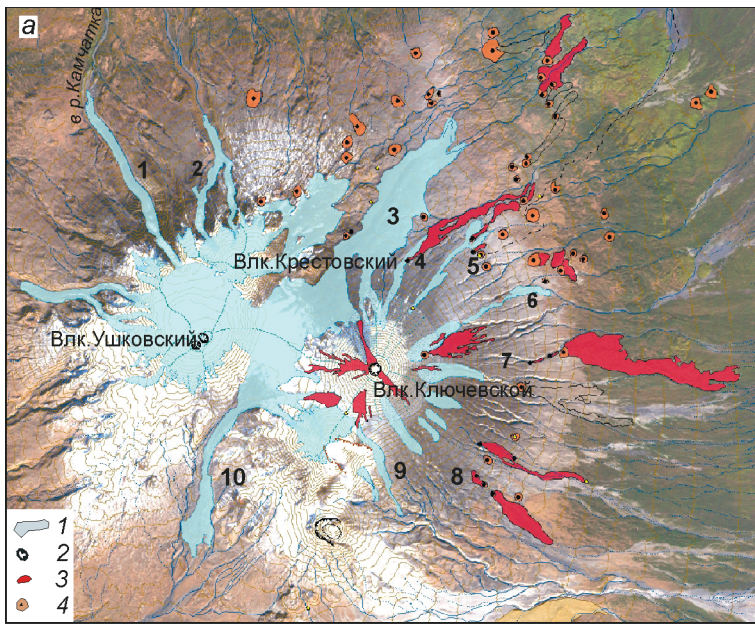
Мы рассмотрим эволюцию ледника Бильченок в Ключевской группе вулканов (Камчатка) с конца XIX в. по настоящее время. Основное внимание будет уделено результатам измерений на языке ледника, выполненных во время подвижки 1982–1984 гг. Они помогут установить сходство и различие подвижек этого ледника как с соседними ледниками, так и с пульсирующими ледниками других горно-ледниковых районов мира.

### Географическое положение и морфология ледника

Кальдерно-долинный ледник Бильченок расположен в северо-западной части Ключевского вулканического массива. Среди особенностей оледенения этого района — его динамичность. Практически все ледники

здесь относятся к нестабильным. Кроме пульсирующего ледника Бильченок, в эту группу входят ледники Эрмана, Богдановича, Шмидта и др. (рис. 1, а) [6].

В северо-западной части массива находится вулкан Ушковский — сложная вулканическая постройка плейстоцена. Вершина вулкана представляет собой обширную кальдеру площадью 24,2 км<sup>2</sup> (4,5 × 5,5 км), которая поднята на высоту 3300–3600 м над ур. моря и заполнена фирном и льдом. Эксцентрично, в юго-западной части кальдеры, находятся два близко расположенных конуса (высшая отметка 3930 м), увенчанных кратерами Горшкова и Герца. Вершинная кальдера вулкана Ушковский служит областью питания крупных камчатских ледников (Эрмана, Богдановича и др.), но большую её часть (61% общей площади) занимает область питания ледника Бильченок. Исток этого ледника лежит в кратере Горшкова и дренирует его компактный фирновый бассейн через узкий прорыв в кромке кальдеры потоком льда шириной 350–400 м. Язык ледника от подножия ледопада полого спускается до высоты около 630 м (максимальное положение после подвижки 1959–1960 гг.). При максимальном продвижении длина ледника Бильченок достигает 18,2 км, из которых 3,6 км приходится на ледопад, а 9,7 км — на долинную часть языка. Плано-вая площадь ледника после подвижки 1959–1960 гг. составляла 23 км<sup>2</sup> и распределялась следующим образом: 5,9 км<sup>2</sup> — долинная часть ледника; 1,9 км<sup>2</sup> — ледопад; остальная площадь — кальдера и прилегающий склон вулкана Крестовский (см. рис. 1, б). Система ледопадов начинается на выходе из кальдеры с отметки 2950 м, а подошва лежит на высоте 1400 м над ур. моря, т.е. перепад высот составляет 1550 м. Полого залегающий язык имеет средний



**Рис. 1.** Современное оледенение Ключевского вулканического массива (вулканы Ключевской, Камень, Безымянный, Крестовский и Ушковский) (а), границы языка ледника Бильченко после подвижек 1959 и 1982–1984 гг. и продольный профиль поверхности ледника Бильченко после подвижки 1959 г. (б) и (в).

1 – ледники; 2 – кратеры действующих вулканов; 3 – конусы; 4 – лавовые потоки побочных извержений Ключевского вулкана; динамически нестабильные ледники: 1 – Бильченко, 2 – Эульченко, 3 – Эрмана, 4 – Влодавца, 5 – Сопочный, 6 – Келля, 7 – Пийпа, 8 – Иванова, 9 – Шмидта, 10 – Богдановича

**Fig. 1.** Present-day glaciation of Kluchevskoiy volcanic massif (volcanoes Kluchevskoiy, Kamen, Bezmyanny, Krestovskiy and Ushkovskiy) (a), boundaries of Bilchenok Glacier tongue after surges in 1959 and 1983–1984 and longitudinal surface profile of Bilchenok Glacier after 1959 surge (b) and (v).

1 – glaciers; 2 – craters of active volcanoes; 3 – cones; 4 – lava flows of lateral eruptions of Kluchevskoiy volcano; dynamically unstable glaciers: 1 – Bilchenok, 2 – Eulchenok, 3 – Ermana, 4 – Vlodavtsa, 5 – Sopochny, 6 – Kellya, 7 – Piypa, 8 – Ivanova, 9 – Schmidta, 10 – Bogdanovicha

уклон поверхности около  $5^\circ$ , за исключением последнего километра после поворота на север, где он увеличивается до  $9^\circ$  (см. рис. 1, в).

По сообщению О. Герца, последнее извержение вершинного конуса вулкана Ушковский произошло, вероятно, весной 1880 г. До недавнего времени достоверные сведения о какой-либо современной вулканической деятельности на этом массиве отсутствовали, однако тепловая активность на вершине вулкана в 1980 г. отмечалась А.А. Овсянниковым, что позднее подтвердилось при полевых исследованиях: здесь были обнаружены термальные площадки общей площадью свыше 5 тыс.  $\text{м}^2$  [12]. На основании этих материалов вулкан был отнесён к действующим. Мощность теплового потока, поступающего через

оба кратера (общая площадь  $0,55 \text{ км}^2$ ), составляет не менее 10 Мвт. Большая часть его реализуется на таяние льда на ложе ледника. В настоящее время отмечаются прогрев кромок кратеров и образование системы геотермических пещер в заполняющем их леднике. Максимальная температура на термальных площадках достигает  $+86^\circ \text{C}$ , что близко к точке кипения воды на этой высоте. Если рассматривать кальдеру в целом, то, вероятно, существуют значительные участки прогрева в области питания ледника. Поступающего глубинного тепла к ложу ледника достаточно для поддержания температуры льда, близкой к точке плавления.

Ледник Бильченко расположен в районе с переходным типом климата (от морского к континенталь-

ному), что обуславливает холодную и относительно сухую зиму, а также тёплое лето. Климатические и экспериментальные измерения показали [11], что верхняя треть области питания ледника относится к рекристаллизационно-режеляционной зоне льдообразования. При исследованиях 1983–1986 гг. установлено, что в этой зоне снег и лёд тают практически только за счёт вулканического тепла, а поверхностная абляция составляет всего 5–10% годовой аккумуляции. В толще снега запаса холода достаточно для повторного замерзания талой воды на глубине до 1 м. В нижней части кальдеры, занятой холодной инфильтрационно-рекристаллизационной зоной, талый сток если и есть, то незначительный, так как вода повторно замерзает чаще всего в пределах годового слоя. Годовая скорость аккумуляции в кратере Горшкова в среднем составляет около 600 мм в.э., а в кальдере – 1200–1300 мм в.э. (по измерениям 1986 г.). Высота границы питания – около 2500 м (в верхней части ледопада).

#### Исторические сведения о динамике ледника

Первые сведения о крупном леднике, стекающем по северо-западному склону Плоской сопки, приводит К.И. Богданович в «Геологическом очерке Камчатки»: «Вершина Плоской сопки покрыта толстым снежным покровом, имеет несколько ледников. Один из них, с северо-запада, питает речку Бильченок. Этот ледник (Крестовый) стоит, так сказать, на границе между ледниками первого и второго порядка и, вероятно, он самый большой из всех ледников Камчатки. Ледник речки Бильченок, который я мог наблюдать из долины реки Камчатки у устья этого притока, спускается далеко за границу леса, т.е. ниже чем 900 м, и имеет очень развитые морены. Воды Бильченка мутно-белые, как у реки Белой, которая течет из-под ледника восточного склона Белого хребта» [1, с. 583].

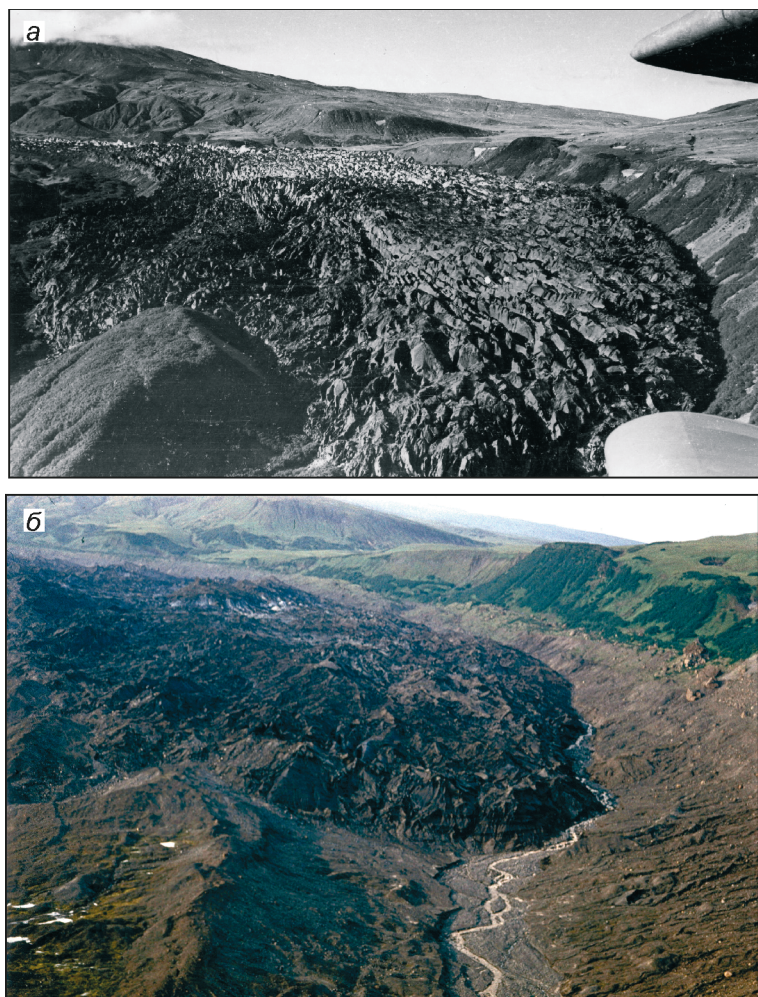
Это сообщение даёт представление о состоянии ледника в конце XIX–начале XX вв. Современная верхняя граница леса также проходит на высоте около 900 м, а фронт языка в стадию деградации поднимается вверх по долине до 900–920 м. Следовательно, в 1897 г. язык ледника достигал размеров, близких к максимальным. Отметим, что с берега р. Камчатка конечная часть ледника, выдвигающаяся из-за поворота долины, достаточно хорошо видна только в периоды крупных подвижек, когда ледниковый язык разбит многочисленными трещинами и из-под моренного чехла видны обнажения льда. Таким образом, можно предположить, что К.И. Богданович видел ледник в стадию подвижки или вскоре после её завершения. Об этом свидетельствует и тот факт, что в 1900 г. В.Н. Тюшов поднимался вверх по долинной части ледника [17], а это возможно только

через 3–4 года после подвижки, когда ледяное тело становится более монолитным.

Б.И. Пийп в очерке об оледенении Ключевской группы вулканов [14] отмечал, что в середине 1940-х годов перед фронтом ледника Бильченок лежал 300-метровый шлейф молодой морены. А на материалах аэрофотосъёмки в сентябре 1949 г. виден активный разбитый трещинами язык, спускающийся по долине до высоты около 800 м, что указывает на происходящую или завершившуюся на момент съёмки подвижку. По-видимому, до начала этой подвижки ледник отступил на расстояние до 0,5 км от нижнего конца моренного комплекса. Информации о поведении ледника в последующие годы нет, но в феврале 1959 г. поступило сообщение, что ледник Бильченок начал быстро продвигаться [2]. Снятие снежного покрова в складки и выпахивание бортов долины, отмечавшиеся наблюдателями, свидетельствовали о высокой скорости движения в первые месяцы подвижки. За два года ледник, пройдя около 2 км, полностью перекрыл свою конечную морену, напоз на небольшую сопку, поросшую кустарником, и достиг деревьев, возраст которых не менее 40 лет (см. рис. 1, б, рис. 2, а). В результате подвижки фронт ледника спустился до высоты 615–630 м, что представляет собой максимальное зафиксированное продвижение конца ледника. Исследования подвижки ледника в 1959–1960 гг. позволили отнести его к «паводочным», или пульсирующим ледникам [2–4 и др.]. Таким образом, ледник Бильченок – крупнейший в России пульсирующий ледник.

После прекращения подвижки ледник стал быстро отступать. К лету 1964 г. он отступил на 15–20 м, а к июлю 1975 г. – почти на 2 км. Поверхность его долинной части понизилась на 60–80 м, а площадь сократилась на 2,6 км<sup>2</sup>. Эпизодические посещения ледника до конца 1970-х годов свидетельствовали о глубокой деградации конечной части ледника до высот 930–950 м при стабилизации и слабом повышении поверхности языка ближе к подножию ледопада. На ряде залётов аэрофотосъёмок 1974–1980 гг. виден фронт активизации ледника, смещающийся в пределах высот 1000–950 м со скоростью около 200 м/год.

При рекогносцировочном обследовании ледника летом 1980 г. замечено небольшое продвижение активного льда, 15–20-метровым обрывом напозающего на «мёртвые льды» подвижки 1959–1960 гг. Наконец, в феврале 1982 г. Бильченок активизировался настолько, что приобрёл черты, характерные для типичного пульсирующего ледника в активную стадию пульсации (см. рис. 2, б): формирование бортовых разломов; отрыв и перенос больших фрагментов боковой морены; «опрокидывание» слоёв; образование полей сераков в долинной части ледника и др.



**Рис. 2.** Язык ледника Бильченок на завершающих этапах подвижек:

*a* – 1959 г., фото А.Г. Остроумова; *б* – сентябрь 1983 г., фото Я.Д. Муравьева

**Fig. 2.** Bilchenok Glacier tongue during the completion of surges:

*a* – 1959, photo of A.G. Ostroumov; *b* – September 1983, photo of Ya.D. Muravjov

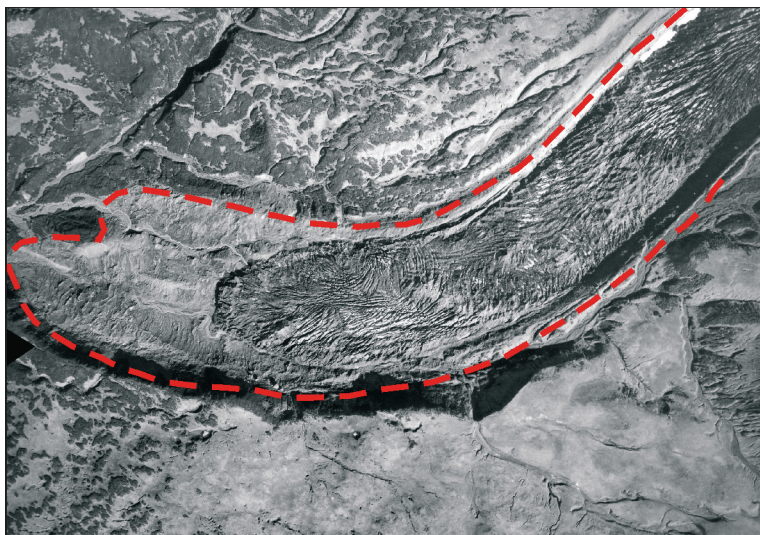
Это послужило основанием для организации в 1982–1983 гг. совместной экспедиции Института вулканологии ДВО РАН СССР и Института географии РАН.

#### Подвижка ледника в 1982–1984 гг.

Комплексное изучение подвижки ледника Бильченок началось в конце марта 1982 г. Проведено общее обследование языка и его фототеодолитная съёмка; измерены скорости движения льда геодезическими методами; зарегистрированы сейсмические шумы, продуцируемые ледником, на фоне которых фиксировались сейсмы от взрывов во время вершинного извержения в это время Ключевского вулкана. Предварительные результаты исследований опубликованы в работах [5, 10]. В сентябре 1982 г. и августе 1983 г. для прослеживания развития подвижки и изменений морфологии долинной части ледника выполнены повторные циклы фотогеодезических и морфологических наблюдений.

В результате фототеодолитных съёмок составлен топографический план ледникового языка в масштабе 1:10 000, который использовался для измерений.

Ледник Бильченок – достаточно сложный объект для фототеодолитной съёмки. Длинный язык, относительно невысокие борта, на бровках которых расположены все съёмочные базисы, в сочетании с расчленённым рельефом поверхности ледника способствовали появлению «мёртвых» зон и требовали закладки большого числа базисов. Всего для составления топоплана использовано восемь базисов. Для совмещения разновременных съёмок применялись три общих репера (крупные камни), расстояния между которыми измерялись светодальномером ЕОК-2000. Все съёмочные точки закреплены на местности 0,2–0,4-метровыми отрезками труб, вбитыми в грунт и обложенными камнями. Точность картографического изображения ситуации и рельефа поверхности исследуемой части ледника и его долины оценивалась по расхождениям, полученным в зонах перекрытия съёмок с разных базисов. Плановая ошибка для чётких и нечётких контуров равна соответственно  $\pm 0,5$  и  $\pm 1$  мм в масштабе картографирования (на местности соответственно 2,5 и 5,0 м). Ошибка определения высот по горизонталям



**Рис. 3.** Аэрофотоснимок языка ледника Бильченок на завершающем этапе подвиги, сентябрь 1983 г. (красным показана граница ледника в 1959 г.)

**Fig. 3.** Airphoto of tongue of Bilchenok Glacier at the completion of surge, September 1983 (red line – the boundary of glacier in 1959)

для неконтурных точек на крутых участках может достигать  $\pm 5,0$  м, а в среднем для большей части ледника составляет  $\pm 1 \div 2$  м.

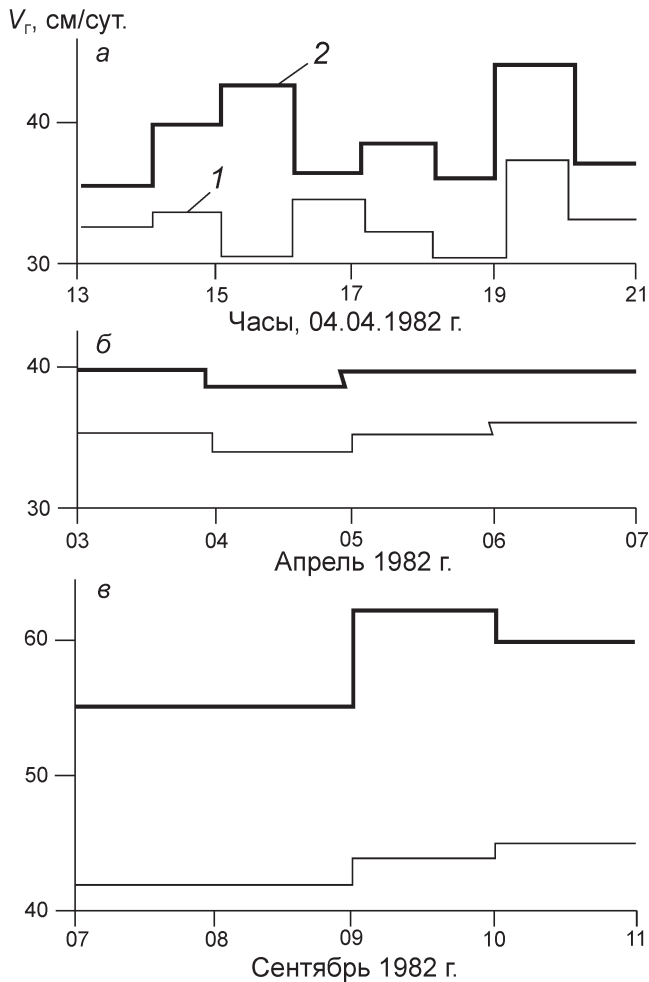
Наряду с фототеодолитной съёмкой вели наблюдения за движением льда. В 1982 г. определена скорость движения для отдельных точек конечной 4-километровой части ледника за разные периоды: первую половину апреля; с апреля по сентябрь; вторую неделю сентября. Чтобы установить колебания скорости движения льда во времени, наблюдения вели с интервалами 1 час, 1 сутки, 5–7 суток и 5 месяцев. Методика измерений предусматривала применение различных способов наблюдений: геодезические засечки контурных точек (вершин и углов приметных камней и других форм ледниковой поверхности); наблюдения с опорных пунктов горизонтально закреплённых на леднике нивелирных реек; светодальномерные измерения смещений отражателей, закреплённых во льду; фотограмметрическое определение способом псевдопараллакса. Для определения скорости движения льда за 5-месячный период делали угловые засечки на вершины одних и тех же положительных форм ледниковой поверхности. По нашим оценкам, плановая точность засечек составляла около 10% величины смещения. Результаты измерения скорости движения льда за разные интервалы времени рассмотрены в следующем разделе.

В 1982 г. выполнены также метеорологические наблюдения по упрощённой программе. В базовом лагере, расположенном на высоте 850 м на правой боковой морене ледника, через 6 ч измеряли температуру воздуха, регистрировали атмосферное давление и отмечали состояние погоды между измерениями. В первой декаде апреля температура воздуха днём была не выше  $-5$  °С, а в ночные часы нередко опускалась до  $-28 \div -30$  °С. Часто бушевали метели,

пурга. На языке ледника шло интенсивное переотложение снега. С 5 по 17 сентября среднесуточные температуры воздуха в лагере изменялись от  $4,5$  до  $9,0$  °С, поднимаясь до  $12-15$  °С в дневное время и опускаясь ночью до  $-1 \div -3$  °С. С 8 по 13 сентября по шести рейкам, забуренным на конечной 2-километровой части ледника, стояло от 24 до 30 см льда. Осадки в это время были редки и незначительны, но почти всё время стояла пасмурная погода. 18 сентября, после прохождения циклона, выпал снег, местами толщиной до 30 см, который лёг уже постоянно.

### Результаты исследований

В середине марта 1982 г. язык ледника, за исключением нижних 2 км, представлял собой область сплошного дробления льда (рис. 3). Наибольшая раздробленность тела ледника была характерна для участка, расположенного в 5–6 км ниже подножия ледопада. Эта зона отчётливо идентифицировалась чистой от морены поверхностью на фоне выше- и нижележащих частей ледника. Отсутствие плаща морены, сераки, небольшое количество снега в понижениях – признаки молодости и недавней активности данного участка. Наклонное и даже «запрокинутое» залегание слоёв в блоках, скорее всего, показывает, что ещё недавно здесь была зона сжатия перед довольно крутым поворотом долины – передовым фронтом активизации. Продвижение фронта сдерживалось нижележащими участками омертвевшего после 1960 г. языка до тех пор, пока напор массы из верхней половины долины не сдвинул вниз «пробку» льда; дальнейшее растрескивание ледника происходило как обычное растяжение с затуханием этого процесса по направлению к подошве ледопада. Об этом свидетельствует характер трещиноватости верхних 5 км долинной части ледника Бильченок, которая была разбита



**Рис. 4.** Скорость движения льда по поперечному профилю ледника, расположенному в 2 км от конца языка: *a* – с интервалом в 1 час 4 апреля 1982 г. на расстоянии 100 (1) и 200 м (2) от края ледника; *b* – с интервалом в 1 сутки с 3 по 7 апреля 1982 г. в тех же точках; *v* – то же, с 7 по 11 сентября 1982 г.

**Fig. 4.** Ice movement velocity at the site of glacier in 2 km from the end:

*a* – with 1-hour time interval during April 04 at 100 (1) and 200 (2) m from the glacier edge (side); *b* – with 1-day interval from 3 to 7 April 1982 at the same points; *v* – the same from 7 to 11 September 1982

на блоки льда в основном с плоскими вершинами, покрытыми слоем ненарушенной морены толщиной до 20 см. Нижний участок языка ледника был относительно монолитен, с редкими участками свежих трещин, обусловленных особенностями рельефа ложа. Очевидно, что конечная часть ледника более или менее консолидированным блоком проталкивалась вниз по долине (см. рис. 3).

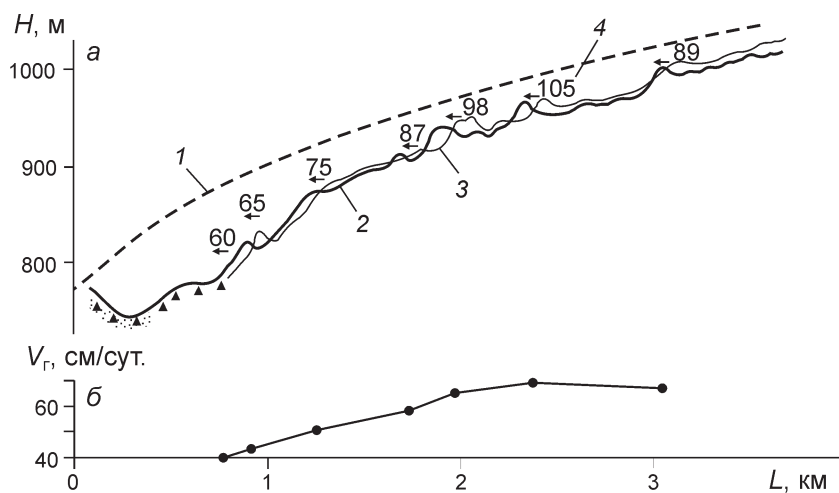
Весной скорость движения (м/сут) в нижней части языка в зоне монолитного льда составляла: 0,40 – конец ледника; 0,46 – в 1 км выше; 0,52 – в 2 км выше. В поперечном направлении отмечалось

лишь незначительное увеличение скорости от борта к центральной части ледника. Измерения по горизонтальным рейкам, установленным в виде поперечного профиля примерно в 2 км от конца ледника, показали, что скорость движения льда составляла: 0,34 м/сут – 10 м от края ледника; 0,37 – 135 м; 0,39 – 170 м; 0,52 – осевая зона (350 м). Такое распределение скорости указывает на преобладание глыбового скольжения конечной части ледника Бильченок по ложу, что обычно отмечается при активизации пульсирующих ледников.

Короткопериодические светодальномерные измерения (с периодом 1 час) внутрисуточного распределения скорости движения льда на том же участке ледника показали равномерный её характер и небольшие флуктуации (не более 20% скорости) между отдельными значениями (рис. 4); незначительными были и колебания среднесуточной скорости в течение недели и в апреле, и в сентябре. Однако осенью абсолютные значения скорости движения льда были примерно в 1,5 раза выше, чем весной (см. рис. 4). На рис. 5 показано изменение высоты поверхности нижней части языка с апреля по сентябрь 1982 г. Хорошо видно перемещение вниз по леднику одних и тех же элементов поверхности. Величина перемещения увеличивалась от 60 м вблизи конца языка до 105 м в 2 км выше. Уровень поверхности 1959 г. показывает, насколько текущая подвижка была менее мощной, чем предыдущая.

За летний период (пять месяцев) скорость движения льда увеличивалась от 0,40 (конец языка) до 0,67 м/сут (2 км от фронта), обнаружив тенденцию к продольному сжатию концевой части. Вверх по леднику, в точке, расположенной вблизи нижней границы зоны свежераздробленного льда (2,3 км от конца ледника), скорость движения льда несколько уменьшилась и составила 0,59 м/сут (см. рис. 5, б). В зоне свежераздробленного льда (около 4 км от конца) скорость опять возросла до 0,80 м/сут, а в зоне растяжения (5 км от фронта) достигла 1,12–1,16 м/сут. На следующий год распределение скорости движения в концевой части ледника почти не изменилось, в то время как абсолютные её значения уменьшились в 2–3 раза, особенно в зоне монолитного льда.

Учитывая собранный материал, мы можем дать характеристику развития подвижки ледника Бильченок в 1982–1984 гг. После замеченного летом 1980 г. начала наступания ледника, он с небольшой скоростью (несколько десятков метров в год) продвигался в течение полутора лет. В феврале 1982 г. произошло проскальзывание конечной части ледника на 400–500 м [10]. Исследования 1982–1983 гг. велись на завершающем этапе подвижки ледника. Тем не менее, скорость движения льда была ещё на порядок выше, чем в середине 1960-х годов после завершения под-



**Рис. 5.** Изменение высоты поверхности (а) и скорость движения льда (б) по продольному профилю языка ледника с начала апреля по начало сентября 1982 г.: 1 – поверхность ледника в 1959 г.; 2 – то же, апрель 1982 г.; 3 – то же, сентябрь 1982 г.; 4 – перемещение элементов поверхности за период наблюдений, м

**Fig. 5.** Change of glacier surface height (а) and ice movement velocity (б) along the longitudinal profile of glacier tongue from the beginning of April to the beginning of September:

1 – glacier surface in April, 1982; 2 – the same in September, 1982; 3 – the same in 1959; 4 – displacement of elements of surface for the period of observations, m

вижки 1959–1960 гг. (в 1964–1965 гг. скорость движения льда составила 6 см/сут в осевой части ледника и 3 см/сут у его края на участке с  $L = 3$  км продольного профиля [2]), а язык продвигался со скоростью около 40 см/сут. Наступание продолжалось ещё примерно два года, а к осени 1984 г. фронт ледника практически остановился. Общее продвижение языка в 1982–1984 гг. составило 700–800 м, и это, по-видимому, привело к очередному закупориванию ледниковой долины перед последним поворотом, что способствовало началу сжатия льда на этом участке.

При сравнении карт ледника, фиксирующих его состояние в 1978 и 1983 гг., отмечен ряд изменений продольного профиля долинной части языка: 1) в зоне оттока льда, длина которой от подножия ледопада составила 4,7 км, поверхность ледника в среднем понизилась на 18 м с максимальным снижением до 30 м; 2) на расстоянии 5,8–8,5 км от подошвы ледопада наблюдалось приращение массы ледника – в среднем поверхность повысилась примерно на 50 м с максимумом до 80 м на повороте долины, а объём привнесённого льда составил 35–40 млн т, что в 3,5 раза меньше, чем в 1959 г.; 3) на участке «мёртвых» льдов длиной 1,25 км, не перекрытых подвижкой 1982–1984 гг., продолжалась интенсивная абляция, в среднем стаяло около 30 м льда. Отметим, что оценка объёма привнесённого льда занижена на величину неучтённой абляции с 1978 по 1981 г., что может составлять около 20–30% имеющегося значения [10].

#### Поведение ледника после подвижки 1982–1984 гг. и его современное состояние

После завершения подвижки 1982–1984 гг. проводились практически ежегодные посещения и облёты ледника, в ходе которых зафиксированы деградация нижней части языка и перемещение фронта активизации вниз по леднику со скоростью 150–200 м в год. С 18 июля по 17 августа 1998 г. ско-

рость движения льда (GPS-измерения) на нижних 2 км языка колебалась от 0,05 до 0,17 м/сут, а таяние льда за этот период составляло 56 мм/сут в.э. Величина таяния значительно уменьшилась в августе, при-



**Рис. 6.** Ледник Бильченок в сентябре 2011 г. Фото Я.Д. Муравьева.

Поверхность долинной части языка повысилась и приобрела выпуклую форму; наблюдаются более активное продвижение фронта ледника и повышенный талый сток, необычный для конца сезона абляции

**Fig. 6.** The Bilchenok Glacier, September 2011. Photo of Y.D. Muravyev.

The surface of valley part of glacier rise and became bulging; be observed more active advance of its front and increased fluvial drainage – unusual for complete ablation season

чём не столько из-за метеоусловий, сколько вследствие увеличения толщины моренного покрова.

К концу лета 2009 г. поверхность нижней части языка вздулась, а фронт активизации достиг морфологического конца ледника – остатка подвижки 1980–1984 гг. Осенью 2010 г. разбитый трещинами язык ледника Бильченок стал виден из долины р. Камчатка, что свидетельствует о его новой активизации. При последнем обследовании ледника в июле 2011 г. установлено общее повышение поверхности, развитие участков трещиноватости в долинной его части, а также продвижение фронта за последний год на 20–30 м (рис. 6).

### Обсуждение результатов

Анализ изложенного материала показывает, что ситуация, сложившаяся на леднике Бильченок в 1982–1984 гг., во многом схожа с тем, что происходит на ряде других пульсирующих ледников и называется подвижкой, или «сёрджем».

При рассмотрении особенностей подвижки этого ледника, сейсмической активности в окрестностях вулкана Ушковский и проявления вулканической деятельности на его вершине отмечено их совпадение по времени [10]. Не исключено, что начало этой подвижки и характер её развития связаны с ростом сейсмической активности, а также повышенным тепловым потоком в кальдере вулкана, влияющим на температуру и реологические свойства льда. Эти факторы могли способствовать увеличению скорости доставки льда из кальдеры вулкана к подножию ледопада, о чём свидетельствуют дугообразные гряды материала обвалов на поверхности долинной части ледника. Указанные внешние причины могли послужить импульсом к вынужденной, более ранней разгрузке напряжений в долинной части ледника. В связи с этим подвижка ледника в 1982–1984 гг. имела меньшие масштабы, чем подвижка 1959–1960 гг., что можно объяснить недостаточными напряжениями, накопившимися в теле ледника.

В то же время, как показывают исследования эволюции этого ледника, крупной его подвижке в 1959–1960 гг. также предшествовала подвижка значительно меньшего масштаба в 1949 г., которая привела к увеличению массы сдерживающей «пробки» в районе последнего поворота долины и накоплению дополнительных напряжений на вышележащем участке вплоть до подошвы ледопада. Положение языка и его внешний облик на снимках 1949 г. удивительно близки характеру и масштабам подвижки 1982–1984 гг. Поэтому есть некоторые основания считать, что следующая подвижка, подготовленная подвижкой 1982–1984 гг., будет

более значительной. Во всяком случае, выполненные исследования позволяют предположить двухтактный характер большого пульсационного цикла ледника Бильченок независимо от причин, его вызывающих. Аналогичные ситуации, когда мощной подвижке ледника предшествовала более слабая, мы наблюдали на ледниках Октябрьский [13] и Сугран [9] на Памире.

Не исключено, что разгадка такого поведения ледника Бильченок лежит в ответе на вопрос, какой ведущий процесс контролирует переключение механизма движения льда в долинной части ледника: связано это только с внутрiledниковой динамикой или вмешиваются внешние факторы (эндогенные или климатические)? Поскольку заметных колебаний климата за последние 50 лет перед подвижкой не было [7], причины нарушения режима пульсации следует искать в усилении вулканической активности. Активизации ледника в 1982 г. предшествовали усиления сейсмической деятельности в окрестностях Ушковского вулкана и современной тепловой активности на его вершине и в кальдере. В 1980–1982 гг. число и мощность землетрясений в этом регионе увеличились, и наметилась тенденция к смещению эпицентров в кальдере вулкана Ушковский [10].

Остановимся ещё на одной особенности: все ледники активизируются в период перехода от зимы к весне, когда температура воздуха, как правило, ниже  $-20\div-30$  °C и какое-либо поверхностное таяние отсутствует. В это же время наблюдается большая разница между ночной и дневной температурами воздуха, что может влиять на изменение физических свойств льда и соответственно на перераспределение напряжений в теле ледника. Кроме того, значительная фильтрация вулканогенных пород, слагающих днище долины, в этих условиях делает сомнительным развитие общепринятого механизма инициирования подвижек – воздействие гидравлических эффектов на ложе ледника.

Как отмечали ранее С.F. Raymond и W.D. Hargison [19], начало быстрых подвижек ледников в зимнее время характерно и для некоторых пульсирующих ледников Аляски, находящихся вне районов активного вулканизма. Причины срабатывания напряжений в теле ледника в зимний, а скорее в переходный к весне период не выяснены. Ими могут быть: двухслойность внутреннего строения долинной части ледника по температурному режиму, что связано с физикой льда в области низких температур (верхняя пачка – холодная, нижняя – тёплая), или, по предположению А.Н. Саламатина, уменьшение сил трения на ложе ледника к зиме в результате формирова-

ния подледных пустот водотоками к концу сезона абляции, способствующих минимальному по площади контакту льда с подстилающими породами и улучшению условий для скольжения.

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ, грант 10-05-00242.

### Литература

1. Богданович К.И. Очерк деятельности Охотско-Камчатской горной экспедиции 1895–1898 гг. // Изв. ИРГО. 1899. Т. 35. Вып. 6. С. 549–600.
2. Виноградов В.Н. Ледник Бильченок // Вопр. географии Камчатки. 1965. Вып. 3. С. 111–115.
3. Виноградов В.Н. Подвижки ледников на Ключевской группе вулканов (Камчатка) // МГИ. 1974. Вып. 24. С. 137–139.
4. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Изменчивость современных ледников вулканических районов Камчатки // МГИ. 1982. Вып. 42. С. 166–172.
5. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д., Тюфлин А.С., Цветков Д.Г. Очередная подвижка ледника Бильченок в Ключевской группе вулканов на Камчатке // МГИ. 1982. Вып. 45. С. 27–29.
6. Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Особенности развития ледников в условиях активного вулканизма // МГИ. 1989. Вып. 66. С. 93–99.
7. Глазырин Г.Е., Муравьев Я.Д., Виноградов В.Н. О климатическом фоне оледенения Камчатки // Гляциол. исследования. 1985. № 27. С. 51–66.
8. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Пульсирующие ледники. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 197 с.
9. Котляков В.М., Осипова Г.Б., Цветков Д.Г. Космический мониторинг пульсирующих ледников Памира // Изв. РАН. Сер. геогр. 2008. № 4. С. 74–83.
10. Муравьев Я.Д., Фарберов А.И., Чубарова О.С., Прибылов Е.С. Сейсмовулканическая обстановка на Ушковском вулкане и подвижка ледника Бильченок в 1980–1983 гг. // МГИ. 1987. Вып. 60. С. 141–147.
11. Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н. Баланс массы и термодинамический режим ледника в кратере Ушковского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 85–92.
12. Овсянников А.А., Муравьев Я.Д. О современной активности вулкана Ушковский (Дальний Плоский) // Вулканизм и связанные с ним процессы: Тез. докл. VI Всес. вулканол. совещания: Вып. 1. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 48–50.
13. Осипова Г.Б., Цветков Д.Г. Ледник Октябрьский, Восточный Памир, в 1945–1990 гг. Особенности эволюции в стадии восстановления и подвижки // МГИ. 2002. Вып. 93. С. 25–34.
14. Пуйн Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 308 с.
15. Роттаева О.В., Котляков В.М., Носенко Г.А., Хмелевской И.Ф., Чернов Р.А. Исторические данные о подвижках пульсирующих ледников на Северном Кавказе и Кармадонская катастрофа 2002 г. // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 136–145.
16. Bindschadler R., Harrison W.D., Raymond C.F., Crosson R. Geometry and dynamics of a surge-type glacier // Journ. of Glaciology. 1977. V. 18. № 79. P. 181–194.
17. Bogdanowitsch K.I. Geologische Skizze von Kamchatka // Petermanns Geogr. Mitteilungen. Gotha. 1904. S. 1–34.
18. Kamb W., Raymond C.F., Harrison W.D. et al. Glacier surge mechanism: 1982–83 surge of Variegated Glacier, Alaska // Science. 1985. V. 227. № 4686. P. 469–479.
19. Raymond C.F., Harrison W.D. Winter initiation of surges // Hydraulic Effects at Glacier Bed. Proc. of the Intern. Workshop. Zurich, Eidgenossische Technische Hochschule. Versuchsanstalt fur Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie [Abstract]. 1986.
20. Raymond C.F., Harrison W.D. Evolution of Variegated Glacier, Alaska, U.S.A., prior to its surge // Journ. of Glaciology. 1988. V. 34. P. 154–169.

### Summary

Evolution of the Bilchenok surging glacier in Kluchevskaya group of volcanoes, Kamchatka, from the end of XIX century to now is presented. After retreat in the beginning of XX century, the glacier became more active and advanced in the late forties. The powerful surge of the glacier has occurred in 1959/60 when its terminus has promoted on 2 km and has gone down to height of 615–630 m in birch forest. During the next glacier advance (1982–1984), glaciological and volcanological researches were done on its tongue. Scale of this advance were less considerable, than the surge of 1959, and the volume of transferred ice was as great as about 35–40 million t., that is 3.5 times less than at the previous one. During the advance of Bilchenok Glacier in 1980–1983, seismic activity near Ushkovsky volcano was marked. We can assume that advance and character of its development are appreciably connected with strengthening of seismic activity, and with the raised thermal stream in caldera of the Ushkovsky volcano, influencing temperature and rheological properties of ice. The large surge of Bilchenok Glacier in 1959–1960 was preceded by a smaller advance, which has led to increase in constraining «stopper» in a trailer part of the glacier and to additional pressure on an overlying site up to a sole of icefall. Nowadays the glacier advances again.