

Путешествия, открытия

УДК 551.32

doi: 10.15356/IS.2015.01.11

Пятьдесят лет исследований Института географии РАН на леднике Медвежьем, Западный Памир

© 2015 г. Г.Б. Осипова

Институт географии РАН, Москва
g.osipova@inbox.ru

Fifty years of studying the Medvezhiy Glacier (West Pamirs) by the Institute of Geography, RAS

G.B. Osipova

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow

*Статья принята к печати 4 сентября 2014 г.**Аэрокосмический мониторинг, подвижка, пульсирующий ледник Медвежий, скорость движения льда, топография.
Aerospace monitoring, ice movement velocity, surge, surging Medvezhiy Glacier, topography.*

Дан обзор исследований, проводившихся Институтом географии РАН на пульсирующем леднике Медвежьем, Западный Памир, в течение 50 лет (1963–2012 гг.). Наземные исследования (измерение высоты поверхности, скорости движения льда, абляции, толщины льда, температуры и др.), проведенные после подвижки 1963 г., позволили определить главные особенности режима пульсирующего ледника и рассчитать баланс массы его пульсирующей части в стадии как восстановления, так и подвижки. За 50 лет было исследовано пять подвижек ледника Медвежий и две стадии восстановления с разной степенью детальности и разными методами. Разработана модель качественного прогноза быстрых подвижек пульсирующих ледников. Сделанный на основе этой модели прогноз подвижки ледника Медвежьего оправдался в 1973 г. В результате аэрофотографического мониторинга (1989–1991 гг.) впервые получены количественные характеристики подвижки ледника от подготовительной фазы до её завершения и начала следующей стадии восстановления. Результаты исследований позволили сформулировать основы космического мониторинга пульсирующих ледников и с помощью съёмки из космоса (Мир, МКС) обнаружить и проследить подвижки этого ледника в 2001 и 2011 гг.

This paper presents a review of field investigations carried out over 50 years (1963–2012) by Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (RAS) on the surging glacier Medvezhiy in the West Pamirs. Ground observations (changes of its surface altitude, ice moving velocity, ablation, the ice thickness, temperature, etc.) performed after the surge of 1963 made it possible to develop a model for qualitative prediction of rapid motions of surging glaciers and to forecast the next surge of this glacier that had proved itself in 1973. In 2001 and 2011, motions of Medvezhiy Glacier were monitored by means of cosmic surveys (satellite Mir and International Orbital Station).

Введение

В начале мая 1963 г. по радио и в газетах сообщалось о быстром продвижении ледника Медвежьего на Памире. И уже в июне экспедиция Института географии АН СССР под руководством Л.Д. Долгушина вылетела на ледник для исследования этого малоизученного явления природы – внезапных быстрых продвижений некоторых ледников. С тех пор в течение 50 лет ледник Медвежий находится под пристальным вниманием учёных Института. Этот ледник стал природной лабораторией исследования различных аспектов режима пульсирующего ледника, чему способствовали сравнительно небольшие (по масштабам Памира) его размеры, доступность, короткий период пульсации и большая амплитуда изменений. На леднике проводились многолетние наземные (гляциологические, ме-

теорологические, гидрологические и др.) наблюдения, а также аэрофотографический и космический мониторинг. На протяжении этих 50 лет, кроме сотрудников Института географии РАН (Л.Д. Долгушин, А.Б. Бажев, Г.Б. Осипова, В.В. Стулов, К.П. Рототаев, И.Ф. Хмелевской, М.М. Соротокин, Д.Г. Цветков, М.Б. Дюргеров и др., к сожалению, некоторых из них уже нет в живых), в исследованиях участвовали сотрудники Таджикгидромета и Таджикского университета, МГУ, Казахского университета, Киргизского АГП ГУГК СССР, а также студенты МГУ, МИИГАиК и просто энтузиасты – любители путешествий и гор. Не все их имена упоминаются в публикациях, но все они в той или иной степени способствовали успехам исследований. Огромное им спасибо. Результаты исследований ледника опубликованы в многочисленных статьях в различных отечественных и зарубежных журна-

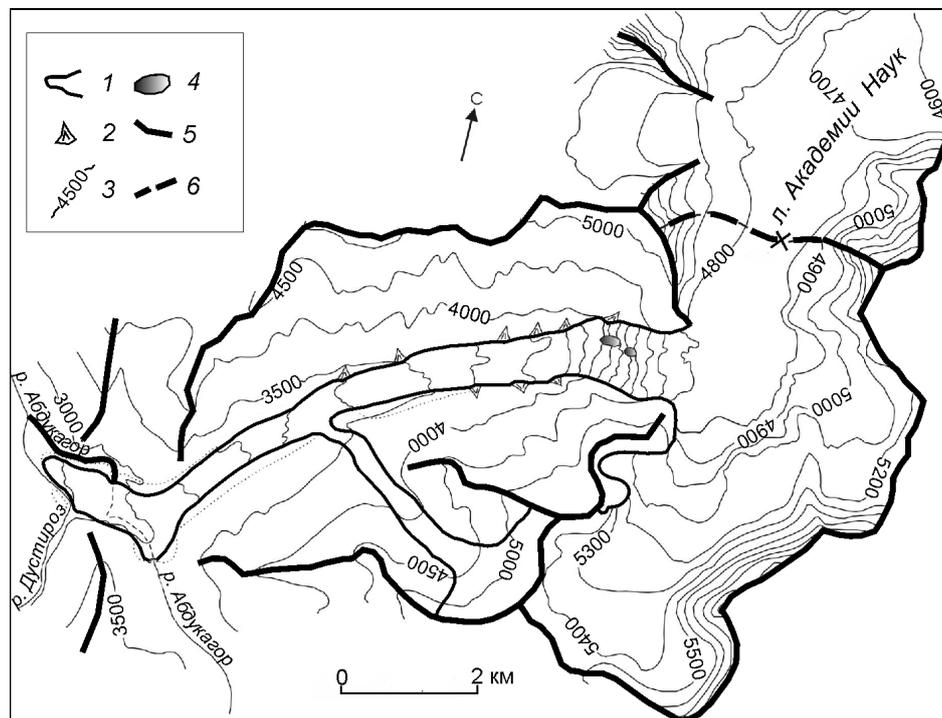


Рис. 1. Топографический план ледника Медвежьего, составленный по аэрофото­снимкам 1968 г.:

1 – граница ледника; 2 – лавинные конусы; 3 – горизонтали; 4 – нунатаки; 5 – хребты; 6 – ледораздел

Fig. 1. Topographic scheme of the Medvezhiy Glacier constructed from aerial survey of 1968:

1 – the glacier boundary; 2 – avalanche cones; 3 – contour lines; 4 – nunataks; 5 – ranges; 6 – icedshed

лах, издана также монография [16]. Эти исследования высоко оценены зарубежными гляциологами, о чём свидетельствует посвящение одной из их работ [34] советским исследователям пульсирующих ледников.

В этой статье даётся обзор исследований Института географии РАН на леднике Медве­жьем в 1963–2012 гг. и кратко излагаются полу­ченные результаты со ссылками на соответствую­щие публикации.

Географическое положение и исторические сведения

Ледник Медвежий расположен в северо­западной части Памира на западном склоне хр. Академии наук в верховьях р. Абдукагор, ле­вого притока р. Ванч (бассейн р. Пяндж). Его фирновая область площадью около 17,5 км² от­делена от узкого языка (площадью 5,5 км²) кру­тым ледопадом (перепад высот 600 м). Общая площадь ледника – около 25 км² (рис. 1). Име­ющиеся исторические сведения о леднике опу­бликованы в работе [16, с. 78, 79]. Из них следу­ет, что ледник испытал подвижку незадолго до 1916 г. Местные жители вспоминают о «сходе» ледника и в 1937 г. Р.Д. Забиров, проводивший исследования на леднике и в его окрестностях

в середине XX в., отмечал его быстрое продви­жение более чем на километр в 1951 г. [20]. Все эти сведения указывают на неустойчивый режим ледника. Однако должного внимания этой его особенности не уделялось, поэтому геологи, проводившие разработку месторождения кварца в верховьях р. Абдукагор, несмотря на наличие свежих селевых отложений, расположили ста­ционарный пос. Дальний и электростанцию в непосредственной близости от ледника.

Подвижка 1963 г.

Подробно подвижка и её последствия описа­ны в исследованиях [13, 28]. Она была замечена 22 апреля 1963 г. уже после того, как вздувший­ся язык ледника перекрыл долину р. Абдука­гор. Конец ледника продвигался со скоростью до 100 м/сут (в среднем около 50 м/сут). Его общее продвижение составило 1750 м, а за ги­гантской ледяной плотиной, созданной язы­ком ледника (толщина льда до 160 м), в доли­не р. Абдукагор образовалось озеро. К середине июня глубина озера достигла 80 м, а объём воды (по уточнённым позже данным) составил 14,5 млн м³ (рис. 2). За заполнением озера и его прорывами вели наблюдения сотрудники Тад­жикского УГМС. Между 18 и 20 июня 1963 г.

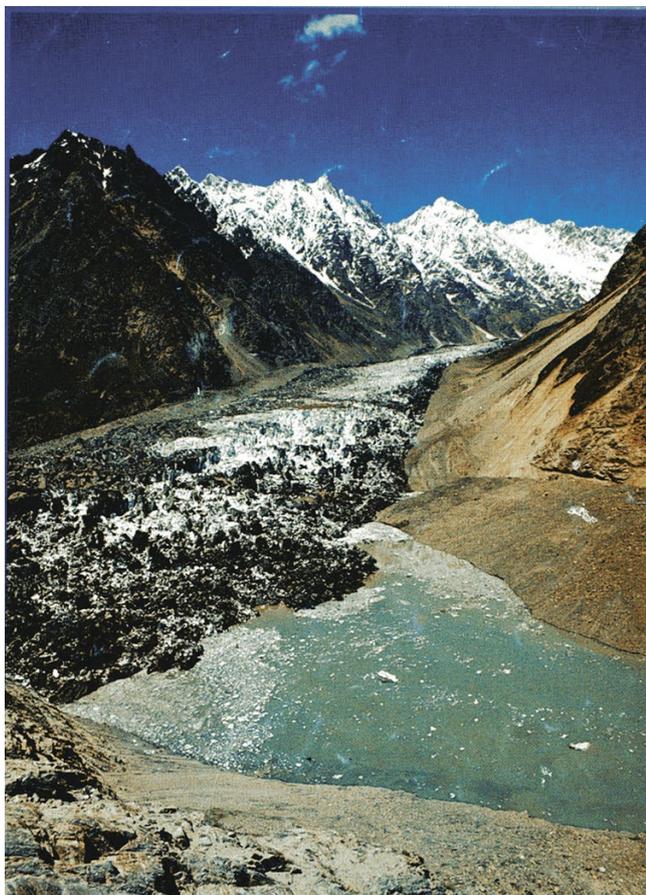


Рис. 2. Озеро, подпруженное продвинувшимся языком ледника Медвежьего в долине р. Абдукагор в 1963 г. Фото К.П. Рототаева, июнь 1963 г.

Fig. 2. The lake dammed by advancing tongue of Medvezhiy Glacier in Abdugagor River in 1963. Photo by K.P. Rototaev, June 1963

вода из озера прорвалась поперёк продвинувшейся части ледника и паводок с расходами до $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ пронёсся вниз по долине. В результате был уничтожен посёлок геологов Дальний, а также затоплена и разрушена электростанция. Мощный водно-ледово-каменный поток уничтожил мосты и линии электропередач в долине р. Ванч, а в ряде мест размыл дорогу. Даже в пос. Ванч, расположенном в 80 км ниже по долине, подъём воды достигал нескольких метров, а на р. Пяндж — 0,5 м. 2 июля произошёл второй столь же мощный прорыв, после чего сток из озера прекратился. После третьего, менее значительного прорыва, сток р. Абдукагор стабилизировался по внутриледниковому тоннелю.

Уже в первой экспедиции, несмотря на её рекогносцировочный характер, были проведены

отдельные измерения скорости движения льда и продвижения языка во время подвижки, описан характер поверхности и сделаны некоторые выводы относительно механизма этого явления [13]. Часть из них подтвердилась при последующих исследованиях, в том числе заключение о периодическом характере явления (в то время оно считалось случайным) и общее предположение о критическом состоянии ледника, достижение которого приводит к быстрому продвижению языка.

Полевые исследования ледника Медвежьего (1963–1987 гг.)

С осени 1963 г. на леднике проводились ежегодные полевые наблюдения в составе Памирской высокогорной экспедиции (до 1977 г. под руководством Л.Д. Долгушина, а затем — А.Н. Кренке). В задачи этих исследований входило выяснение основных закономерностей поведения пульсирующего ледника и получение достаточно полных и точных количественных характеристик его динамики, режима и вещественного баланса как основы для выявления причин и механизма ледниковых подвижек и возможности их прогнозирования. При обследовании фирновой области ледника там не было отмечено никаких изменений — они отмечались только на языке ледника до подножия ледопада [20], поэтому исследования велись главным образом на пульсирующей части ледника — его языке.

К основным параметрам, характеризующим динамику ледника (внутренний массообмен), относятся изменение высоты его поверхности и скорость движения льда. Для получения этих параметров на леднике была разбита местная геодезическая сеть и проводились повторные фототеодолитные съёмки, дополненные аэрофотосъёмками и измерениями скорости движения льда. С 1964 по 1985 г. было выполнено более 20 фототеодолитных съёмок пульсирующей части ледника. Топопланы, составленные по этим съёмкам, позволили определить изменения высоты поверхности, а также послужили основой для вычисления вещественного баланса пульсирующей части ледника и решения ряда других задач.

Измерения скорости движения льда методом геодезических засечек на забуренные в лёд вехи начались сразу после подвижки 1963 г. и продолжались на протяжении всей стадии восстановле-



Рис. 3. Фототеодолитная съёмка ледника в 1973 г. после подвижки.

На склоне видны останцы льда, фиксирующие поверхность ледника перед подвижкой. Фото Л.Д. Долгушина, сентябрь 1973 г.

Fig. 3. Phototeodolite survey of Medvezhiy Glacier in 1973 after the surge.

It is seen the ice remnants at slope of valley fixed the surface of glacier before the surge. Photo by L.D. Dolgushin, September 1963

ния, во время подвижки 1973 г. и в последующую стадию восстановления. Методика измерений и их результаты изложены в работах [16, 23, 30 и др.]. Температуру льда на леднике Медвежьем в 1964 г. измерял И.Ф. Хмелевской, а в 1972 г. — Е.Н. Вилесов. Исследования показали, что температура льда с глубиной повышается и ниже 15–20 м близка к точке плавления. Количественная характеристика интенсивности и суммарные значения поверхностной абляции льда получены путём измерений по скоростным рейкам, на контрольных площадках и с помощью повторных фототеодолитных съёмок. В 1972 г. на леднике выполнены метеорологические наблюдения, на основе которых с использованием данных ГМС Ледник Федченко за 1954–1973 гг. рассчитана поверхностная абляция [9]. Плотность льда, определённая Е.Н. Вилесовым в 90 пунктах, изменялась от 0,874 до 0,914 г/см³ (средняя 0,898 г/см³).

Для определения толщины льда и рельефа ложа на трёх поперечных профилях в нижней половине языка (ниже его левого притока — см. рис. 1) проводили гравиметрические измерения [4]. В верхней части языка (выше притока) подлёдный рельеф определялся совместным анализом крупномасштабных топопланов на разные даты съёмок и результатов оценки толщины льда балансовым методом Н.Н. Пальгова [16, с. 90–95]. Успеху такого исследования способствовало значительное понижение поверхности в верхней части языка во время подвижек, в результате чего обнажились обшир-

ные участки склонов долины, ранее закрытые льдом (рис. 3). Скважины, пробуренные в 1978 г. в верхней части языка до его ложа (максимальная глубина скважин 145 м) (М.М. Соротокин), показали толщину льда, близкую к расчётной. Позднее подобные работы были выполнены и для зоны ниже ледопада [6].

Для топографии ложа ледника характерно чередование крутых уступов и пологих участков, местами с обратным уклоном. Эта особенность подлёдного рельефа влияет на скорость движения льда и характер активизации ледника. Эпизодические гидрологические наблюдения (Г.П. Моисеева, В.Г. Изосимов) показали, что подавляющая часть талых вод стекает внутри ледника и под ним. Это позволило предположить, что талые воды играют существенную роль в скольжении ледника не только во время подвижки, но и на стадии восстановления. В 1965 [3] и 1985 гг. [19] в фирновой области ледника были выполнены масс-балансовые наблюдения, которые позволили рассчитать накопление льда за периоды между подвижками.

На основе измерений, выполненных на леднике Медвежьем, создаётся база данных, содержание и структура которой определялись задачей разработки оптимальной методики оперативного прогноза времени и масштабов подвижек ледника на основе изучения закономерностей кинематики его поверхности [10]. Используя технологию ГИС, путём компьютерного анализа были получены поля основных ха-



Рис. 4. Ущелье, прорезанное р. Абдукагор в толще языка ледника Медвежьего в 1971 г. В ледяном обрыве отчётливо видна плоскость скола, по которому верхняя толща более чистого льда скользит по придонному сильно заморенному мёртвому льду. Фото В.В. Стулова, август 1971 г.

Fig. 4. The ravine washed by the Abdukagor River in the body of the Medvezhiy Glacier in 1971. The shear plane along which the upper younger layers of clean ice thrust over the lower, enriched by moraine, is clearly seen in ice cliff. Photo by V.V. Stulov, August 1971

рактических ледника и их изменений во время подвижки и в стадию восстановления, а также пространственно-временные поля динамики поверхности ледника за 1968–1991 гг. [11].

Особое внимание уделялось исследованиям Абдукагорского подпружного озера – основного источника катастрофических паводков [16, с. 142–153]. Наблюдения за накоплением и прорывами озера проводились в 1963 и 1973 гг. в сотрудничестве с гидрологами Таджикистана [29]. Фототеодолитная съёмка ванны озера после его опорожнения позволила уточнить его объёмы и гидрографы прорывов. Исследования показали, что образование озера, его объём, а также время, интенсивность и пути прорывов определяются не только морфологией и размерами ледяной плотины, но и особенностями движения льда во время подвижки, и возникающими при этом гляцио-тектоническими структурами в ледниковой толще. В частности, путь прорыва озера поперёк ледника был обусловлен наличием глубинного скола, по которому во время подвижки верхняя толща льда скользила по придонной, сильно заморенной толще мёртвого льда (рис. 4).

Стадия восстановления, 1963–1972 гг.

Уже в первые годы наблюдений на леднике Медвежьем были выработаны главные принципы исследований пульсирующего ледника и предложены основные понятия и термины [14, 21].

Установлено, что полный период (цикл) пульсации ледника состоит из двух стадий – стадии подвижки и стадии восстановления. Сразу после подвижки нижняя часть языка, лишённая подтока льда сверху (зона деградации), омертвела и начала разрушаться в результате интенсивной абляции и транзитных водотоков. В верховьях пульсирующей части ледника (зона активизации) за счёт регулярного поступления льда из фирновой области началось повышение поверхности, постепенно распространявшееся на всё большую часть ледника (см. рис. 2, 3 в работе [22]).

По данным об изменении высоты поверхности ледника между датами фототеодолитных съёмок и по величине поверхностной абляции за те же периоды (с учётом влияния моренного покрова) был рассчитан вещественный баланс пульсирующей части ледника между подвижками 1963 и 1973 гг. и во время подвижки 1973 г. [18]. За девять лет стадии восстановления (1963–1972 гг.) в зоне активизации накопился избыток льда, равный 175 млн т. Эта величина – критическая для ледника Медвежьего. Даже незначительное её увеличение или улучшение условий движения льда может вызвать релаксационную разрядку напряжений в ледяном массиве и выброс избыточной массы льда вниз по долине, т.е. привести к подвижке языка.

Вычисленный по измерениям на языке ежегодный приток льда из фирновой области через ледопад составил 28,5 т. Накопление

в фирновой области за 1954/55–1964/65 составило 29,3 млн т в год [3], а за 1963–1973 гг. – 30,2 млн т в год [19]. Таким образом, величина прихода льда на язык ледника, вычисленная по его вещественному балансу, и величина накопления в фирновой области примерно одинаковы. Повышение поверхности и увеличение уклона ледника в зоне активизации сопровождалось увеличением скорости движения льда как по абсолютным значениям, так и по площади ледникового языка. Были зафиксированы значительные сезонные колебания скорости с максимумом в весенне-летнее время и колебания от года к году [16, 24]. Неустойчивый характер движения свидетельствует о большой роли глыбового скольжения в движении ледника.

Таким образом, на протяжении всей стадии восстановления происходит активизация ледника, постепенно захватывающая всё большую часть ледникового языка. Для определения скорости активизации было введено понятие фронта активизации – границы между активизирующейся и деградирующей частями ледника [25]. Фронт активизации постепенно продвигается вниз по леднику, и продвижение это происходит неравномерно. Ускорения продвижения фронта активизации («микродвижки») связаны с его выходом на крутые уступы ложа, а замедления – с подпруживающим влиянием подлёдных ригелей и сужений долины. Наиболее яркая микродвижка произошла в 1966–1967 г., когда фронт активизации вышел на ригель над устьем притока и продвинулся менее чем за год почти на 1300 м [15].

К концу стадии восстановления поверхность ледника в верховьях повысилась до уровня, который она занимала перед подвижкой 1963 г. (критический уровень). При интенсивном таянии и разрушении нижней части языка продольный профиль становился всё более крутым. Таким образом, ледник приближался к критическому состоянию, при котором малейшее ослабление подпора в концевой части или увеличение продольного напряжения за счёт возрастания нагрузки в верховьях приводит к образованию разрывов и сколов и очередной подвижке ледника. Подобный закономерный характер режима пульсирующего ледника открывает возможность прогноза его подвижек.

По результатам исследований режима ледника Медвежьего в стадию восстановления была

разработана качественная модель прогноза подвижки пульсирующего ледника по скорости его активизации. Это – комплексный принцип прогноза, при котором необходимо учитывать скорость повышения поверхности ледника и увеличения его уклона, характер изменения по продольному профилю скорости движения льда, скорость продвижения по леднику фронта активизации, скорость накопления критической массы льда и др. Попытка прогноза подвижки ледника Медвежьего по указанным выше параметрам была предпринята в 1970–1971 гг. Предполагалось, что следующая подвижка ледника произойдет в 1973–1974 гг. [15, 31], о чём были оповещены местные организации. Прогноз оправдался – следующая подвижка ледника началась весной 1973 г.

Подвижка ледника 1973 г.

Уже осенью 1972 г. ледник достиг критического состояния. Поверхность льда в верховьях пульсирующей части поднялась до критического уровня. Скорость движения льда на всём протяжении зоны активизации летом 1972 г. была максимальной за всё время наблюдений (от 150–200 см/сут в средней части языка до 300 см/сут и более выше притока), а фронт активизации почти достиг концевого обрыва. Кроме того, в 1972 г., в отличие от предыдущих лет, не произошло уменьшения скорости движения льда к осени. Вероятно, высокая скорость движения сохранялась и зимой, вслед за чем она резко увеличилась и началась подвижка [17]. Сообщение о подвижке поступило от местных жителей в середине апреля 1973 г, а 9 мая отряд Института географии АН СССР прибыл на ледник и начал наблюдения (рис. 5). К этому времени язык ледника уже перегородил реки Дустироз и Абдукагор и в долине последней образовалось озеро, максимальный объём которого составлял 16,4 млн м³. Прорывы озера происходили, как и в 1963 г., поперёк ледника с расходами до 1400 м³/с. Однако, благодаря заблаговременному предупреждению, были приняты меры по защите сооружений в Ванчской долине и больших разрушений удалось избежать.

Несмотря на некоторые различия в продолжительности и масштабах, подвижки 1963 и 1973 гг. были схожи по своим внешним про-



Рис. 5. Продвигающийся ледник Медвежий в июне 1973 г. Фото Г.Б. Осиповой

Fig. 5. Advancing Medvezhiy Glacier in June 1973. Photo by G.B. Osipova

явлениям и результатам. Очевидно, сжог был и их механизм. В результате подвижки в верхней части языка (зона выноса) поверхность ледника понизилась в среднем на 61 м (максимум 110 м), а в нижней части (зона привноса и продвижения) — повысилась в среднем на 86,6 м (максимум 150–180 м) (см. рис. 5). Масса льда, перемещённого в 1972–1973 гг., составила 187,6 млн т — величина, примерно равная избытку льда в зоне активизации, накопившемуся за предшествовавшую стадию восстановления [18].

На заключительном этапе подвижки в разных частях ледника неоднократно измерялись скорости движения льда — фиксировалось их уменьшение от 10–12 до 0,05–0,1 м/сут. В конце июля — начале августа скорость движения льда на всём протяжении ледникового языка резко упала и подвижка завершилась. Общее продвижение конца языка составило 1925 м. Во время подвижки в прибортовых частях ледникового языка образовались краевые разломы, которые прослеживались на несколько километров. В 2 км от конца языка за 20 суток (10 мая — 1 июня) скорость движения льда на обрыве такого разлома и в осевой зоне ледникового потока была практически одинакова (9–10 м/сут), что указывает на скольжение отсечённой этими разломами части ледника вдоль склонов долины и по ложу или по глубинным сколам внутри ледника. Об этом же свидетельствует сохранившееся взаимное расположение 14 вех, которые были забурены в сентябре

1972 г. и найдены по завершении подвижки. Эти вехи за время подвижки переместились на расстояние от 2000 м (нижняя по течению группа) до 2960 м (верхняя) при общем продвижении конца на 1925 м. Это наглядно свидетельствует о преобладании в стадии подвижки напряжений растяжения в верховьях пульсирующей части ледника и сжатия — в низовьях [17].

Наземные исследования ледника Медвежьего после подвижки 1973 г.

После подвижки 1973 г. наземные наблюдения заключались главным образом в исследованиях изменения высоты поверхности, пространственно-временных колебаний скорости движения льда и скорости активизации ледника. При этом число скоростных вех было значительно увеличено и наблюдениями была охвачена вся пульсирующая часть ледника до подножия ледопада. Расширился и временной диапазон (наблюдения вели с ранней весны до осени и в течение суток). Решались методические задачи усовершенствования программы наблюдений за движением льда, проводились упрощённые метеонаблюдения, измерения абляции, сделана попытка связать с ними и с водным режимом ледника колебания скорости движения льда [30]. Установлено, что в результате роста средней летней температуры воздуха за последнее десятилетие на 1 °С приход льда с ле-

допада значительно уменьшился, а таяние льда возросло. Это привело к уменьшению скорости накопления критической массы льда и увеличению продолжительности стадии восстановления. Сделан вывод, что ожидать следующую подвижку следует не ранее чем в 1987 г. [6].

По измерениям и расчётам М.Б. Дюргерова и др. [19], в фирновой области ледника за 1973–1983 гг. накопление массы составило 27,7 млн т в год, что меньше, чем за 1963–1973 гг. (30,2 млн т в год). На этом основании авторы также делают вывод, что подвижка произойдёт не ранее 1985–1986 гг. Обобщая все имеющиеся данные наблюдений за скоростями движения льда после подвижки 1973 г., А.Б. Буйницкий [5] выделяет «микроразрывы» в 1976, 1978, 1981–1982 и 1986 гг., причём во время последней фронт активизации продвинулся на 1,7 км и почти достиг конца ледника, однако не вышел за пределы омертвевшего языка. В 1985 г. поверхность ледника в зоне активизации ещё была почти на 30 м ниже критического уровня. Таким образом, все исследователи, проводившие наблюдения в стадию восстановления после подвижки 1973 г., отмечали, что активизация ледника происходит по той же схеме, что и в предыдущую стадию восстановления, хотя и со значительным отставанием во времени. Причины этого – повышение температуры воздуха и ухудшение условий питания.

Однако в 1987 г. фронт активизации уже достиг положения 1972 г., а поверхность ледника в верховьях пульсирующей части была выше критического уровня [7], что свидетельствовало о приближении очередной подвижки. В связи с этим возникла необходимость организации наблюдений, которые позволили бы при относительно небольших затратах получать оперативную информацию об эволюции ледника, базирующуюся на точных количественных данных, в первую очередь об изменениях высоты его поверхности.

Аэрофотографический мониторинг ледника Медвежьего

Подвижка 1988–1989 г. В Институте географии РАН была разработана и успешно выполнена программа аэрофотографического мониторинга, которая предусматривала повторные аэрофотосъёмки ледника, их оперативную об-

работку и анализ [26]. Всего с 21 июня 1988 г. по 10 сентября 1991 г. было выполнено 18 аэрофотосъёмок в масштабе около 1:35 000. Оперативная обработка стереопар выполнялась совместно с Киргизским АГП ГУГК СССР. Таким образом, всего через несколько дней после аэрофотосъёмки становилась доступной информация о динамике ледника за интервалы между съёмками: изменения высоты поверхности по продольному профилю ледника с точностью 1–2 м, изменения планового положения границ ледника и подпрудного озера с точностью 2–3 м, а также скорость движения льда и продвижения языка (см. рис. 4 в работе [33]). В результате анализа этих материалов были прослежены: формирование наступающего конца ледника и постепенное возрастание скорости его продвижения от 0,2 до 2 м/сут на начальном этапе подвижки (лето 1988 г. – март 1989 г.); начало заметного ускорения движения от 2 до 5 м/сут в марте – первой половине мая 1989 г.; стремительное нарастание скорости от 5–15 до 30–50 м/сут во второй половине мая – июня; снижение скорости и завершение подвижки в июле – октябре 1989 г. Характер этой подвижки был подобен двум предыдущим, но масштабы её были меньше. Ледник продвинулся всего на 1,1 км, а озеро в долине р. Абдукагор имело незначительный объём. Оно просуществовало всего около месяца и было спущено вдоль левого борта ледника без катастрофических последствий. Менее значительным был и вынос льда из верховьев пульсирующей части ледника – максимальное понижение поверхности там составило всего 50 м, в то время как в 1963 г. оно было 80 м, а в 1973 г. достигало 100 м и более [21, 33] (рис. 6).

В ходе мониторинга в сотрудничестве с лабораторией космических методов МГУ был проведён специальный эксперимент по определению методом аэропсевдопараллакса скорости движения льда на всём протяжении языка, включая его подледопадную и ледопадную зоны [33]. Полученная в 1988–1991 гг. серия аэрофотоснимков и результаты их обработки уникальны. Это – первый случай в мировой гляциологии, когда была количественно охарактеризована динамика ледника за весь период подвижки – от подготовки до завершения. До сих пор все наблюдения подвижек проводились «постфактум», в лучшем случае на их завершающем этапе. Кроме



Рис. 6. Продвинувшийся язык ледника Медвежьего летом 1989 г. Фото К.П. Рототаева
Fig. 6. Advanced tongue of the Medvezhiy Glacier in summer 1989. Photo by K.P. Rototaev

того, эти исследования показали возможность достаточно точных измерений изменений высоты поверхности и скорости движения льда на всей площади ледника дистанционными методами, не прибегая к трудоёмким и опасным наземным наблюдениям.

Космический мониторинг

В последующие годы эстафету исследований ледника приняли космонавты. Ледник Медвежий стал учебно-демонстрационным объектом, который служил эталоном для обучения космонавтов основным признакам пульсирующего ледника на разных стадиях пульсации для выявления пульсирующих ледников и их мониторинга. Сам же ледник Медвежий с 1996 г. вошёл в число объектов периодических наблюдений российских космонавтов. Координация этих работ и обучение космонавтов проводятся в лаборатории Института географии РАН под руководством Л.В. Десинова. Ему же поступают материалы съёмок для последующего анализа.

В феврале 2001 г. российскими космонавтами с борта орбитальной станции «Мир» на леднике Медвежем были обнаружены признаки увеличения скорости движения льда — чёрные

прибортовые разломы, окаймляющие заснеженный язык. А в 20-х числах мая в средствах массовой информации появились сведения о продвижении конца ледника. Снимки космонавтов были переданы в Главтаджикгидромет, и в конце июня ледник был обследован сотрудниками этой организации. К этому времени продвижение языка практически завершилось. По сравнению с 2000 г. он продвинулся всего на 450–500 м, не дойдя 200–250 м до русла р. Абдукагор. Отличительные черты этой подвижки — сравнительно небольшое продвижение конца ледника и незначительное опускание поверхности в верховьях пульсирующей части (вспомним, что в 1973 г. поверхность здесь понизилась на 70–100 м) [12].

С 2001 г. космические исследования ледника проводились в рамках программы «Ураган». Эта программа предусматривала визуально-инструментальные наблюдения и съёмки на МКС и выполнялась совместно Институт географии РАН и ракетно-космической корпорацией «Энергия». Научное руководство программой, включая постановку задач, обучение космонавтов, оперативное сопровождение визуальных наблюдений, анализ поступающей информации, были возложены на Институт географии РАН. После подвижки 2001 г. фронт активизации про-

Подвижки ледника Медвежьего, исследованные на протяжении 50 лет (1963–2011 гг.)

Год	Продвижение конца, м	Объём подпрудного озера	Вид наблюдений	Информация
1963	1750	14,5 млн м ³ , с катастрофическими прорывами поперёк ледника	Наземные рекогносцировочные	[13, 28]
1973	1925	16,4 млн м ³ , с катастрофическими прорывами поперёк ледника	Наземные наблюдения, фототеодолитные съёмки	[16, 17]
1988–1989	1100	Объём незначителен, спуск вдоль левого края ледника	Аэрофотограмметрический мониторинг, наземные измерения сотрудников Таджикгидромета	[22, 26, 32]
2001	450	Озеро не образовалось	Наблюдения космонавтов, полевое обследование сотрудниками Таджикгидромета	[12, 23]
2011	Более 800 м			

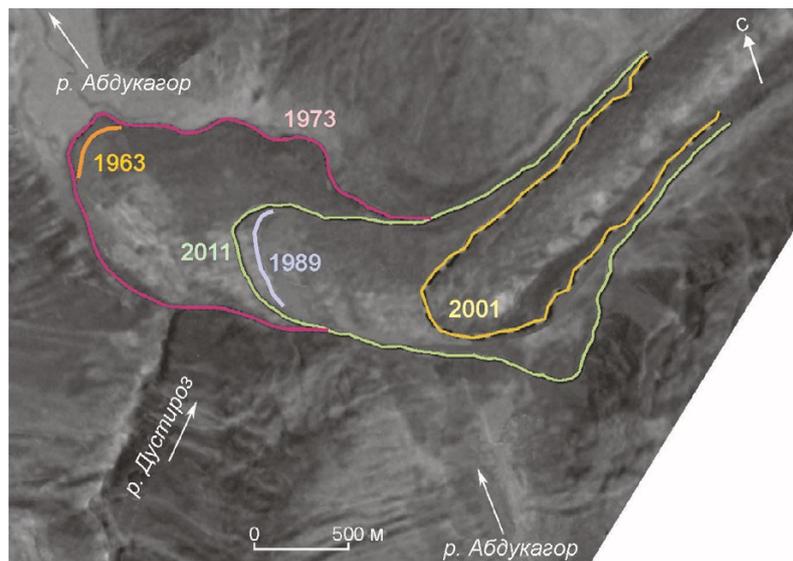


Рис. 7. Схема положения фронтальной части ледника Медвежьего после завершения подвижек (годы подвижек даны на схеме) [23]

Fig. 7. Map of the Medvezhiy Glacier front at the end of surges (years of surges are at the map) [23]

двигался вниз по языку со скоростью около 250 м в год. В августе 2010 г. облик ледника указывал на приближающуюся подвижку, а в марте 2011 г. с МКС поступило сообщение о начале быстрого движения – вдоль бортов появились тёмные полосы продольных разрывов, хотя продвижение языка зафиксировано ещё не было. В конце мая МЧС Республики Таджикистан сообщило о быстром наступании языка, в результате которого его фронт уже приблизился к р. Абдукагор. Завершилась подвижка в июле. На снимке с МКС от 22 августа видно, что язык продвинулся более чем на 800 м, на 50–100 м далее его продвижения в 1989 г., и перегородил долину р. Абдукагор. Однако следов озера обнаружено не было, вероятно, сток р. Абдукагор происходил между левым бортом ледника и склоном долины. По космиче-

ским снимкам отмечена также синхронная с ледником Медвежьим подвижка его единственного левого притока [23].

Таким образом, за 50 последних лет было пять подвижек ледника Медвежьего (таблица, рис. 7). А всего есть сведения, по крайней мере, о восьми его подвижках: 1913–1915, 1937, 1951, 1963, 1973, 1989, 2001 и 2011 гг. Возможно, ещё одна подвижка, между 1915 и 1937 гг., осталась незамеченной. Период между подвижками составляет 10–14 лет. Поскольку при подвижках ледника образуются подпрудные озёра с катастрофическими прорывами, за ледником необходимо вести постоянное наблюдение. Возможно, в ближайшем будущем космический мониторинг станет наиболее действенным способом слежения за режимом этого ледника.

Заключение

На леднике Медвежьем в течение 50 лет проводились исследования кинематики поверхности наземными, воздушными и космическими методами. С помощью наземных наблюдений была детально исследована и количественно охарактеризована динамика пульсирующего ледника на протяжении полного цикла пульсации, определены особенности его режима в стадии подвижки и восстановления, предложены основные понятия и термины. Разработана методика прогноза быстрых подвижек пульсирующих ледников на основе наблюдений за их режимом и вещественным балансом в стадию восстановления и доказана возможность такого прогноза. Впервые в мировой практике на нём был применён аэрофотографический метод для исследования кинематики поверхности пульсирующего ледника в преддверии, во время и после подвижки.

Система признаков пульсирующего ледника на разных стадиях пульсации была использована для выявления пульсирующих ледников и их каталогизации [27], а также для разработки системы мониторинга нестабильных ледников [22]. Материалы исследований послужили основой для ряда теоретических разработок [2, 8, 9 и др.]; карты и графики, характеризующие морфологию и режим ледника, помещены в Атласе [1 с. 353]. В результате выполненных исследований ледник Медвежий стал одним из наиболее изученных пульсирующих ледников мира.

Литература

1. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Ред. В.М. Котляков. М.: изд. РАН, 1997. 392 с.
2. Бадд У.Ф., Макиннес Б.Дж. Периодические подвижки ледника Медвежий и модель течения льда // МГИ. 1978. Вып. 32. С. 143–161.
3. Бажев А.Б. Методы определения внутреннего инфильтрационного питания ледников // МГИ. 1980. Вып. 39. С. 73–81.
4. Берикашвили В.Ш., Мачерет Ю.Я. Определение мощности льда и рельефа подледного ложа горных ледников методом подбора с помощью ЭВМ // МГИ. 1974. Вып. 24. С. 146–155.
5. Буйницкий А.Б. Колебания активности ледника Медвежьего на заключительном этапе стадии восстановления // МГИ. 1988. Вып. 63. С. 63–70.
6. Буйницкий А.Б., Соротокин М.М. Определение рельефа дна активной части ледника Медвежьего расчётным методом // МГИ. 1985. Вып. 55. С. 195–201.
7. Буйницкий А.Б., Соротокин М.М. Поведение ледника Медвежьего в 1982–1984 гг. // МГИ. 1986. Вып. 56. С. 99–106.
8. Войтковский К.Ф. О механизме подвижки ледника Медвежьего // МГИ. 1974. Вып. 24. С. 68–77.
9. Волошина А.П. Внешний энергообмен ледника Медвежий на Памире // МГИ. 1976. Вып. 26. С. 131–135.
10. Гарелик И.С., Котляков В.М., Осипова Г.Б., Цветков Д.Г. Создание гляциологической информационной системы пульсирующего ледника // Изв. РАН. Сер. геогр. 1994. № 3. С. 125–137.
11. Гарелик И.С., Котляков В.М., Осипова Г.Б., Цветков Д.Г. Компьютерный анализ динамики пульсирующих ледников // Изв. РАН. Сер. геогр. 1996. № 4. С. 55–63.
12. Десинов Л.В., Котляков В.М., Осипова Г.Б., Цветков Д.Г. Снова дал знать о себе ледник Медвежий // МГИ. 2001. Вып. 91. С. 249–253.
13. Долгушин Л.Д. Пульсирующие ледники // МГИ. 1968. Вып. 14. С. 298–300.
14. Долгушин Л.Д., Евтеев С.А., Кренке А.Н., Ротоматов К.П., Сватков Н.М. О периодических быстрых подвижках ледников и внезапном продвижении ледника Медвежьего на Памире // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1964. № 5. С. 30–39.
15. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Пульсации ледников и проблема их прогнозирования на примере ледника Медвежьего (Западный Памир) // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1972. № 2. С. 89–98.
16. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б., Стулов В.В. Подвижка ледника Медвежьего в 1973 г. и основные черты предшествовавшей ей эволюции ледника // МГИ. 1974. Вып. 24. С. 77–86.
17. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Баланс пульсирующего ледника Медвежьего как основа прогнозирования его периодических подвижек // МГИ. 1978. Вып. 32. С. 161–170.
18. Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Пульсирующие ледники. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 192 с.
19. Дюргеров М.Б., Айзин В.Б., Буйницкий А.Б. Накопление массы в области питания ледника Медвежьего за периоды между его подвижками // МГИ. 1985. Вып. 54. С. 131–135.
20. Забиоров Р.Д. Оледенение Памира М.: Географгиз, 1955. 372 с.
21. Казанский А.Б. Результаты обследования области питания ледника Медвежьего // Геофизический бюллетень. 1965. № 15. С. 52–60.
22. Котляков В.М., Осипова Г.Б., Цветков Д.Г. Особенности мониторинга динамически нестабильных ледников // МГИ. 2006. Вып. 100. С. 38–48.

23. *Котляков В.М., Десинов Л.В.* Подвижка ледника Медвежьего в 2011 году // Лёд и Снег. 2012. № 1 (117). С. 128–131.
24. *Осипова Г.Б.* Скорость движения льда пульсирующего ледника Медвежий // Тр. САРНИГМИ. 1974. Вып. 14 (95). С. 15–26.
25. *Осипова Г.Б.* Определение положения фронта активизации на пульсирующих ледниках по морфологическим признакам и наземным наблюдениям // МГИ. 1983. Вып. 47. С. 121–126.
26. *Осипова Г.Б., Цветков Д.Г., Бондарева О.А., Морозов В.Ю.* Возможности аэрофотографического мониторинга пульсирующих ледников (на примере ледника Медвежьего, Западный Памир) // МГИ. 1990. Вып. 68. С. 149–156.
27. *Осипова Г.Б., Цветков Д.Г., Шетинников А.С., Рудак М.С.* Каталог пульсирующих ледников Памира // МГИ. 1998. Вып. 85. С. 3–136.
28. *Рототаев К.П.* Ледник Медвежий бунтует // Побежденные вершины. Годы 1961–1964. М.: Мысль, 1966. С. 165–183.
29. *Соколов Л.Н., Янбулат А.А.* Наступание ледника Медвежьего и прорывы подпрудного озера в 1973 году // Изв. АН ТаджССР. Отд. физ.-мат. и геол.-хим. наук. 1974. № 3. С. 102–109.
30. *Цветков Д.Г., Соротокин М.М.* Колебания скорости движения ледника Медвежьего в период его восстановления // МГИ. 1981. Вып. 41. С. 133–142.
31. *Dolgoushin L.D., Osipova G.B.* Glacier surges and the problem of their forecasting // IAHS Publ. 1975. № 104. P. 292–304.
32. *Knizhnikov Yu.F., Osipova G.B., Tsvetkov D.G., Kharkovets E.G.* Measurements of the movement of surging glaciers by the method of aeropseudoparallaxes (using the Medvezhiy Glacier as an example) // МГИ. 1997. Вып. 81. С. 55–60.
33. *Kotlyakov V.M., Osipova G.B., Tsvetkov D.G.* Fluctuations of unstable glaciers: scale and character // Annals of Glaciology. 1997. V. 24. P. 338–343.
34. *McInnes B, Radok U., Budd W.F., Smith I.N.* On the surging potential of polar ice streams. Pt. 1. Sliding and surging of large ice masses. University of Colorado at Boulder, USA, University of Melbourne. 1985. 53 p.

Summary

Overview of researches conducted over 50 years (1963–2012) by Institute of Geography RAS on the surging glacier Medvezhiy, the West Pamirs is given. Ground investigations (changes of its surface altitude, ice movement velocity, ablation, ice thickness, temperature and others) made after surge 1963 allowed finding the basic features of this glacier regime and calculating the mass balance of its surging part for the whole cycle from the recovery phase up to a surge. Using the results a quality model for prediction of rapid motions of surging glaciers had been developed. Forecast of the next surge of the Medvezhiy Glacier made for 1973 on the basis of this model had been justified. As a result of the aerial and topographic monitoring (1989–1991) the glacier surge was quantitatively followed for the first time over its whole cycle, i.e. from a surge up to a next stage of its recovery. Results of our researches allowed formulating the foundations of the space monitoring of surging glaciers. In 2001 and 2011 surges of the glacier were detected and traced using the satellite imagery (MIR, ISS). In total for 50 years, five surges of this glacier and two full cycles of its life were investigated by various methods in different details.