

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 7th International Conference

Chengdu, China, 23–27 September 2024



Edited by
S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2024

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
7-й Международной конференции

Чэнду, Китай, 23–27 сентября 2024 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2024

泥石流： 灾害、风险、预测、防治

會議記錄

第七届国际会议

中国成都, 2024年9月23日至27日



編輯者

S.S. Chernomorets, K. Hu, K. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC

莫斯科

2024

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). – Ed. by S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC. 622 p.

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. 622 с.

泥石流：灾害、风险、预测、防治。會議記錄 第七届国际会议. 中国成都。 編輯者 S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – 莫斯科: Geomarketing LLC. 622 p.

ISBN 978-5-6050369-6-8

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), К. Ху (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (Lomonosov Moscow State University), K. Hu (Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS), K.S. Viskhadzhieva (Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

© Селевая ассоциация

© Debris Flow Association



Анализ механизмов пульсаций ледника Медвежьего на Памире

Ф.Х. Каримов

*Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии
Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан,
farshed_karimov@rambler.ru*

Аннотация. В настоящей статье представлено физическое моделирование пульсаций ледника Медвежьего. Получены общие условия для нарушения устойчивости ледника, рассмотрены частные случаи различных форм его тела, представлены оценки для влияния давления, температуры на состояние вещества ледника. На основании оценок влияния давления представлена трехслойная модель активной части ледника: верхний жесткий слой, промежуточный – вязко пластический, нижний – вязко пластичный, на границе с ложем. Применено уравнение Навье–Стокса для описания регулярного движения ледника. Модель пульсаций ледника основана на наблюдаемом факте накопления ледником критической массы, при превышении которой нарушается устойчивость. Рассмотрены механизмы пульсаций: механизм роста объемного фактора, основную роль которого выполняют масса активной части и гравитация, и его превалирование над поверхностным, в виде сопротивления трения и сцепления, механизм вязко пластического течения, механизмы гидроразрыва резервуара и обрушения структурных связей в основании активной части ледника. Показана принципиальная возможность возникновения ледовых землетрясений и резонансного влияния сейсмичности на возникновение пульсаций.

Ключевые слова: ледник Медвежий, устойчивость ледника, моделирование пульсаций, механизмы пульсаций, вязко пластичность, вязкость льда, ложе, граничные условия, коэффициент трения, сцепление, таяние льда, гидравлические эффекты

Ссылка для цитирования: Каримов Ф.Х. Анализ механизмов пульсаций ледника Медвежьего на Памире. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 238–251.

Analysis of the surging of the Medvezhiy Glacier on Pamirs

F.H. Karimov

*Institute of geology, earthquake engineering and seismology, National academy of
sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan, farshed_karimov@rambler.ru*

Abstract. This article presents physical modeling of the surging of the Medvezhiy glacier on Pamirs in Tajikistan. General conditions for breaking the stability of a glacier are obtained, special cases of various forms of its body are considered, and estimates are presented for the influence of pressure and temperature on the state of the glacier's substance. Based on estimates of the influence of pressure, a three-layer model of the active part of the glacier is presented: the upper rigid layer, the intermediate visco-plastic one, the visco-plastic in bottom, at the border with the bed. The Navier-Stokes equation is used to describe the regular movement of the glacier. The glacier surge model is based on the observed fact that the glacier accumulates a critical mass, above which stability is disrupted. The mechanisms of surges are considered: the mechanism of growth of the volume factor, the main role of which is played by the mass of the active part and gravity, and its prevalence over the surface one, in the form of friction and adhesion resistance, the mechanism of visco-plastic flow, the mechanisms of hydraulic fracturing of the reservoir and the collapse of structural connections at the base of the active part of the glacier. The fundamental possibility of the occurrence of ice earthquakes and the resonant influence of seismicity on the occurrence of pulsations is shown.



Key words: *Medvezhiy Glacier, glacier stability, surge modelling, surge mechanisms, visco plasticity, ice viscosity, bed rocks, boundary conditions, friction coefficient, cohesion, ice thawing, hydraulic effects*

Cite this article: Karimov F.H. Analysis of the surging of the Medvezhiy Glacier on Pamirs. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhiya K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 238–251.

Введение

Ледник Медвежий, расположенный в долине р. Ванч в северо-западной части Памира, на высотах от 3000 м до 5000 м н.у.м., привлекает пристальное внимание исследователей с середины XX в., прежде всего, как активно пульсирующий. Его пульсации, и особенно крупные из них со смещениями на расстояния 1,5 км и более со скоростями до 100 м/сут по порядку величины, приносят масштабные стихийные бедствия для населения и территорий Ванчской долины и р. Пяндж: перегораживается русло р. Абдукагор и образуется запрудное озеро с объемом до 20 млн м³, и последующий прорыв образовавшейся дамбы приводит к паводкам и селям (рис. 1). Пульсации происходят в среднем с повторяемостью 10–14 лет [Котляков и др., 2021, Осипова, 2015]. Последняя крупная пульсация произошла в 2011 г. и поэтому можно ожидать очередной его пульсации в период 2021–2025 гг. Действительно, активизация ледника в настоящее время подтверждается данными космической съемки, сделанной в 2020 г. – фронтальная часть продвигается со скоростью около 1 м/сут и уже произошло частичное перегораживание русла р. Абдукагор, вода которой пробивается через придонную часть запруды [Котляков и др., 2021].

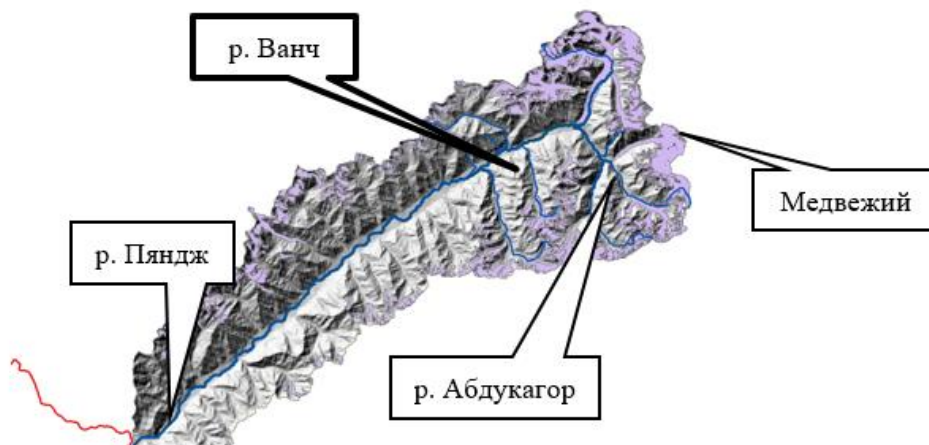


Рис. 1. Долины р. Ванч, р. Абдукагор и ледник Медвежий (топооснова Google)

Полевые наблюдения 2021 г. также показали, что р. Абдукагор перегорожена и вода реки просачивается через основание образовавшейся запруды (рис. 2, 3) [Каримов, 2022].

В прогнозировании селей, которые могут быть вызваны прорывом подпруженных пульсирующим ледником водоемов, наряду с учетом уровня воды в них важное место отводится мониторингу состояния ледников на стадии подготовки, до наступления активной фазы пульсации [Перов, 2012]. Поэтому для снижения риска пульсаций и проведения соответствующих мероприятий по защите населения и территории необходимо знать морфологию ледника и механизм подвижек. В ряде работ представлены качественные заключения о причинах этих пульсаций. В работе [Ротомаяев, 1966] в качестве главной причины выделяется фактор накопления льда перед



различного рода препятствиями на пути движения ледника: «крутыми перегибами ложа, скальными порогами, сужениями канала стока, поворотами». С увеличением ледовой мощности увеличивается давление на придонную часть ледника. Выдвигается предположение, что рост этого давления перед препятствием и увеличивающееся поглощение геотермического тепла приводят к повышению температуры и плавлению льда. Образуется водная смазка и при критической нагрузке скорость течения ледовой массы резко возрастает – происходит пульсация. При этом роли увеличения атмосферных осадков и землетрясениям в наступлениях ледников отводится второстепенная, триггерная роль.



Рис. 2. Язык ледника Медвежьего в августе 2021 г.



Рис. 3. Подпруживание р. Абдукагор по состоянию на август 2021 г.

В работе [Долгушин и др., 1978] на основании полевых наблюдений в районе ледника Медвежий обнаружена важная роль в возникновении его пульсаций накопления критической ледовой массы, примерно равной 175 млн т. Это значение согласуется с объемом 200 млн м³, определенного в работе [Яблоков, 2012]. Действительно, это можно обнаружить, если принять для плотности ледовой массы характерное значение 875 кг/м³ [Cuffey et al., 2010]. Отмечена также важная роль скорости роста высоты и увеличения уклона поверхности ледника, изменения скорости движения льда по продольному профилю, скорости активизации фронтальной части, скорости накопления критической массы. Сравнительно частая повторяемость и высокая интенсивность пульсаций ледника Медвежьего объясняется особенностями его морфологического строения: обширная пологая фирновая область переходит в очень крутой ледопад высотой около 700 м, и далее спускается вниз полого расположенный семикилометровый язык [Осинова, 2015]



(рис. 4). В результате у подножия ледопада в тылу языка скапливается главная, огромная масса льда, которая подпружена сужением в ущелье и порогом языка. В этой работе предполагается, что на возникновение пульсаций наиболее сильное влияние оказывает мощное линзообразное тело ледника. При достижении линзой критических размеров «происходит ее резкая подвижка, возникает волна вздутия и затем сильно выдвигается язык». Кроме того, под линзой может происходить скопление воды вследствие выпадения дождей и потепления воздуха.

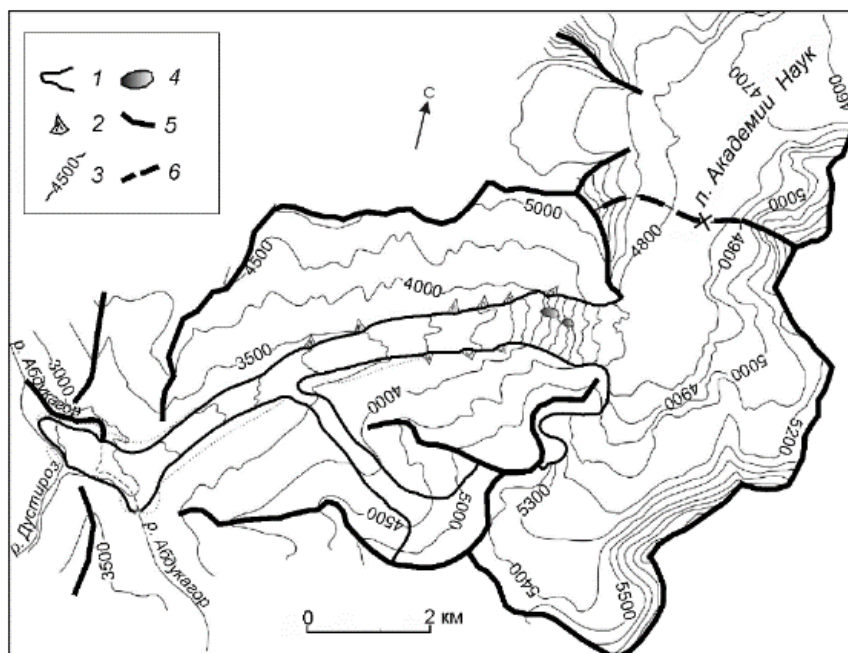


Рис. 4. Топографический план ледника Медвежьего: 1 – границы ледника, 2 – лавинные конусы, 3 – горизонталы, 4 – нунатаки, 5 – хребты, 6 – ледораздел

В работе [Каримов, 2019] даны количественные оценки для критических условий пульсации ледника Медвежьего на основе представлений о законе «куб-квадрат», позволяющем объяснить почему при малых объемах ледника пульсаций не происходит, а при достижении им критических размеров – происходит. Суть закона состоит в том, что при малых размерах тел, расположенных на наклонной поверхности, гравитационная сила, которая пропорциональна объему тела и обуславливает скольжение вниз по этой поверхности, мала по сравнению с силами сцепления и трения, действующими на тело. Для равноразмерных тел объем пропорционален кубу среднего радиуса, а площадь поверхности сцепления – его квадрату. Соответственно, при малых радиусах превалирует роль площади, а при больших – объема, и поэтому при достижении критических размеров состояние покоя тела нарушается.

В настоящей статье представлено физическое моделирование условий пульсации ледника Медвежьего. Рассмотрены общие условия для нарушения устойчивости ледника, рассмотрены частные случаи различных форм его тела и геометрических размеров, представлены оценки для влияния давления, температуры на сцепление и коэффициент трения ложа, коэффициента динамической вязкости ледникового льда, внутреннего давления резервуара с водой или водного глинистого раствора в основании на границе с вмещающими породами ложа на возникновение пульсаций. Проведены расчеты и оценки для регулярного движения ледника на основе применения уравнения Навье-Стокса для вязко-пластического течения. Анализируются механизмы возникновения пульсаций ледника, в основе каждого из которых лежит фактор накопления его критической массы. Обсуждается роль землетрясений в нарушении устойчивости ледника и возникновении пульсаций.



Физическая модель ледника Медвежьего и методы расчетов

Так же, как в работе [Каримов, 2022], модель пульсирующей части ледника Медвежьего будем рассматривать в рамках представлений о теле, расположенном на наклонной плоскости с углом откоса α . Угол склона ложа в месте аккумуляции льда, как можно определить на основании отношения перепада высот местности по данным рис. 4, отказывается равным около 6° при среднем уклоне ступенеобразного ложа 6° [Котляков и др., 2018].

Для выбора модели и расчетов пульсаций будем исходить, согласно работе [Долгушин и др., 1978], из следующих фактов. В регулярном состоянии ледник движется со скоростью около 1 м/сут. Ледовая масса движется вниз по склону в области аккумуляции и после основного ледопада утолщает язык. Постепенно фронт этого утолщения смещается вниз вдоль языка и в результате сжатия со стороны узкого ущелья, из-за малого уклона поверхности скольжения и подпруживания краевой мореной он оказывается сжатым в направлении движения. Перед пульсацией нижняя часть языка приподнимается примерно на 100 м, а верхняя на столько же опускается, происходит вспучивание тела языка и далее – подвижка в виде быстрого скольжения глыб.

Для определения особенностей движения ледника сделаем некоторые заключения относительно формы и геометрических размеров наиболее активной его части, принимающей главное участие в пульсациях. В критическом состоянии, когда наступает нарушение устойчивого равновесия и начинается пульсация, масса этой части языка может составлять 175 млн т [Долгушин и др., 1978], объем – 200 млн м³ [Яблоков, 2012], максимальная толщина ледника – 400 м, ее прирост – 175 м, во фронтальной части ледника его ширина равна 700 м [Ротоматов, 1966]. Выше по склону ширина ущелья примерно в 1,5 раза уже, средняя ширина активной части языка равна 500 м – представим в качестве 1-го приближения, что она имеет форму полу эллипсоида с высотой h , шириной w , длиной вдоль склона l (рис. 5).

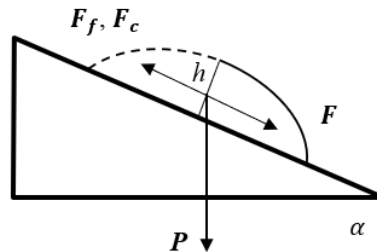


Рис. 5. Схема расположения пульсирующего тела ледника на склоне в ложе

Тогда, согласно данным о геометрических характеристиках правильной формы [Котляков и др., 2018], половинный объем тела, имеющего форму полу эллипсоида, можно представить в виде:

$$V = \frac{1}{3} \pi h w l, \quad (1)$$

откуда находим, что $l = 1000$ м. Таким образом, действительно, активная часть языка должна иметь имеет вытянутую вдоль склона форму.

Площадь основания этого тела имеет выражение –

$$S = \frac{1}{4} \pi w l. \quad (2)$$

Для определения состояний, в которых находятся слои ледника примем во внимание критические значения давлений переходя из упругого состояния в вязкопластическое и далее – к нарушению сплошности тела ледника. Согласно работам



[Федынский, 1978, Hooke, 2005, Cuffey et al., 2010] предел упругости при сжатии составляет около 1 МПа. Предел твердости льда при квазистатических деформациях оценивается в 4,5–5,0 МПа [Cuffey et al., 2010, McCarthy et al, 2017], для ледникового льда предел пластичности – 2,5–3,0 МПа [Пфаффенгольц, 1993]. Из сравнения ледниковой массы с мерзлыми грунтами следует, что при мгновенном или предельно длительном сжатии последних при температурах от 1 до 10⁰С – сопротивление составляет около 1 МПа, а на разрыв – в 2–6 раз меньше [Цытович, 1973]. Из формулы для литостатического давления p слоя с плотностью ρ и толщиной h

$$p = \rho gh, \quad (3)$$

следует, что переход от упругого состояния в вязкопластическое должен происходить при толщине верхнего слоя ледника, равной 120 м, а из вязкопластического – к состоянию с нарушенной сплошности при толщине тела 300–360 м.

По данным глубинного зондирования максимальная толщина языка ледника Медвежьего перед подвижкой 1973 г. составила 400 м, а прирост – 175 м [Роттаев, 1966, Долгушин и др., 1978]. Если учесть, что предел упругости ледникового льда составляет 2,5–3,0 МПа [Пфаффенгольц, 1993], то расчет на основании (3) показывает, что критические давления для разрушения льда в нижних частях ледника должны соответствовать толщине 300–360 м. Таким образом, можно также ожидать, что наряду с пластическими деформациями могут иметь место процессы разрушения льда в самых нижних частях ледника на границе с ложем.

Таким образом, при толщинах от 120 до 300 м активную часть языка ледника можно рассматривать как двухслойный – верхний слой толщиной 120 м в виде твердой пластины, а нижний – вязкопластической. При накоплении массы ледник здесь утолщается и при толщинах более 300 м в нижнем слое на контакте с ложем резко падает прочность пород – происходит нарушение сплошности тела ледника. Состояние регулярного движения ледника со скоростью 1 м/сут [Котляков и др., 2021, Долгушин и др., 1982] качественно подтверждает, что нижний слой находится в вязкопластическом состоянии и толщина его действительно может находиться в пределах от 120 до 300 м.

Согласно современным представлениям в нарушении устойчивости части тела ледника, принимающего участие в пульсациях, большую роль играют сцепление и коэффициент трения тела на границе с подстилающими породами ложа. Как уже отмечалось в работах [Долгушин и др., 1978, Осипова, 2015], на снижение сцепления и коэффициента трения сильно влияют повышенные температуры в этой зоне, создающие таяние льда и смазку для скольжения. В качестве источников повышенных температур здесь называются повышенные давления и геотермическое тепло. Действительно в таких термодинамических процессах как, например, адиабатических, при которых в результате быстрого сжатия вещества при экранировании теплопередачи, происходит его нагревание [Hooke, 2005]. Но в случае ледников резкое возрастание давления может происходить не непосредственно от роста приращения массы, а в результате перехода льда от упругого к пластическому состоянию, для которого характерно действие внутреннего трения с соответствующим выделением тепла. При пластических деформациях, также как и при трещинообразовании во льду, происходит активация атомно-молекулярных колебаний и нагревание.

Роль геотермического, в частности, радиогенного тепла в повышенных температурах в районе ледника Медвежьего также высока, что обусловлено активными тектоническими процессами, сочетаниями гетерогенных, сильно дислоцированных герцинских, альпийских и новейших структур, что выражено в значительных перепадах поверхности Мохо – от 40–50 км в Таджикской Депрессии до 70–75 км на Памире [Баратов и др., 1981]. Тепловой поток на Памире, также как в Альпийских зонах складчатости, относительно высокий, до 150 мВт/м², и, например, он почти в 2 раза выше, чем в Таджикской депрессии [Фузайлов и др., 1982]. Породы ледника в средней, нижней и языковой частях находятся в зоне от 2850 до 4000 м н.у.м., т.е. ниже высот распространения вечномерзлых пород (рис. 4), и, следовательно в большей степени



подвержены агрегатным переходам. Рост ледовой массы способствует росту литостатического давления и большей экранизации теплового потока земной коры от выхода через ледник. Поэтому повышенный тепловой поток на Памире и приращения ледовой массы действительно могут играть важную роль в таянии льда в нижних частях ледника.

Большая роль температурного режима для условий скольжения ледника подтверждается лабораторными экспериментами [Hooke, 2005, Cuffey et al., 2010, Zoet et al., 2013]. Было найдено, в частности, что рост температуры льда от -20°C до 0°C при действующем нормальном давлении 100 кПа и скорости деформации 10 мк/с приводит к снижению коэффициента трения между льдом и подстилающими породами ложа от 0,5 до 0,15. Снижение коэффициента трения от 0,35 до 0,2 при росте температуры от -6°C до -3°C также обнаружено и при давлениях 2 МПа [Zoet et al., 2013].

В существующих публикациях, посвященных исследованиям процессов деформаций льда, наблюдается большой разброс данных относительно пределов упругости, пластичности, прочности, коэффициентов трения, сцепления. Непосредственные измерения коэффициентов трения и сцепления в основании ледников весьма затруднительны из-за труднодоступности этой зоны для непосредственного изучения *in situ*, например, посредством бурения скважин или проходкой туннелей. В некоторых работах, например [Jones, 1979, Fowler et al., 1987, Kamb, 1987, Cuffey et al., 2010], подчеркивается, что эта зона остается самой малоизученной в гляциологии, остаются мало изученными такие процессы как плавные скольжения, подвижки, замедления или остановки в движении льда. Осложнения с этими определениями происходят от многозначности генезиса и строения ледовых масс, их зависимости от температур, неоднородностей структуры и текстуры, скорости нагружения, изменениями структуры в процессе деформирования, таяния или режеляции, анизотропии деформационных и реологических свойств. Поэтому многие исследования свойств льда в этой зоне ведутся косвенными, лабораторными, методами, и необходимо учитывать существующие неопределенности в расчетах и моделировании динамики ледников.

Исходя из изложенного, можно следующим образом в целом охарактеризовать модели и механизмы динамики ледника Медвежьего. Накопление ледовой массы играет ключевую роль в возникновении пульсаций, однако конкретные механизмы могут быть при этом разные. В одном случае пульсация вызвана ростом вклада объемного фактора, обусловленного гравитацией, который становится большим, чем вклад фактора поверхностного, обусловленного трением и сцеплением на границе тела и ложа. В другом механизме – рост массы до критических значений приводит к разрушению в нижней части ледника и тем самым к потере ею несущей способности. В третьем – в результате роста ледовой массы происходит таяние льда на границе с ложем, и при этом возникает смазка к скольжению тела как целого, либо, если талая вода зажата в некотором объеме внутри этой границы телом ледника, то действует гидростатическое давление, отрывающее тело ледника от ложа, что приводит к нарушению его устойчивости и пульсации. Эти механизмы могут действовать и одновременно в сочетаниях друг с другом.

Механизм нарушения предельного равновесия

Рассмотрим механизм нарушения равновесия активной части ледника, обусловленный ростом объемного фактора до критического состояния, когда он начинает превалировать над поверхностным. Объемный фактор обусловлен массой и силами гравитации, а поверхностный – силами сухого трения, сцеплением и вязкостью на границе ледника и ложа. Проекция силы гравитации P на направление вниз по склону F способствует спуску тела в этом направлении, а силы трения F_f и сцепления F_c – удерживанию тела от скольжения (рис. 5). Согласно закону механики [Хайкин, 1971, Кравченко, 2016] в состоянии равновесия векторная сумма действующих на тело сил равна нулю:



$$F + F_f + F_c = 0. \quad (4)$$

Для общего случая ледника, имеющего сложную форму тела, условие предельного равновесия (4) представим в виде:

$$\rho V g \sin \alpha = k \rho V g \cos \alpha + c S, \quad (5)$$

где V – объем тела, S – поверхность сцепления тела с ложем, ρ – плотность льда тела, k и c – коэффициент трения и сцепление, соответственно, между телом и ложем.

В приближении однородности тела по его высоте h его объем можно записать в виде интеграла по слоям высоты:

$$V = \int_0^h S(h) dh,$$

где $S(h)$ – площадь поверхности слоя толщиной dh , расположенного на высоте h от основания.

Выражение (5) приводится к квадратному уравнению относительно синуса угла откоса, решая которое, получим

$$\sin \alpha = \frac{A \pm k \sqrt{1+k^2-A^2}}{1+k^2}, \quad (6)$$

где введено обозначение

$$A = \frac{cS}{\rho g V}. \quad (7)$$

С учетом (1) и (2) выражение (7) представим после сокращений в виде:

$$A = \frac{c}{\rho g h}. \quad (8)$$

В выражении (6) в результате решения соотношении (5) относительно синуса имеет место неоднозначность, вызванная двумя знаками перед квадратным корнем. Поскольку равенство (6) должно выполняться при всех значениях коэффициентов k и c , так, чтобы выполнялось условие $0 \leq \sin \alpha \leq 1$, в том числе при предельно малых и равных нулю c , то можно заключить, что верен только положительный знак.

Фазовое состояние для нарушения устойчивости тела ледника как целого на наклонной плоскости с уклоном β^0 , синус которого равен 0,1, как вытекает из (6), (8), определяется условием

$$\frac{A+k\sqrt{1+k^2-A^2}}{1+k^2} \geq 0,1,$$

откуда следует, что между критическими значениями k и c должно выполняться равенство:

$$k \approx 0,1 - \frac{c}{\rho g h}, \quad (9)$$

и наибольшее значение k , при котором принципиально возможно нарушение устойчивости тела как целого, равно 0,1. Представим условие фазового равновесия с помощью графика зависимости k от c (рис. 6). Затемненная область показывает область значений k в зависимости от c , в которой возможно нарушение рассматриваемой устойчивости.

Физический смысл фазовой зависимости очевиден – чем больше коэффициент трения, тем при меньших сцеплениях может быть нарушение устойчивости, и –



наоборот. Наибольшее значение сцепления, c_m , в состоянии устойчивости имеет место при нулевом трении, и оно согласно (9) должно быть равно 0,27–0,32 МПа соответственно для толщин ледника 300 и 360 м.

Оценим возможные значения сцеплений для некоторых характерных значений коэффициентов трения скольжения – 0,02 и 0,05 [Каримов, 2019; Мячкин и др., 1975; Хайкин, 1971]. В регулярном состоянии движения ледника, которое согласно выбранной в настоящей работе модели должно происходить при толщинах менее 300–360 м, согласно (6) и (8) для случая $k = 0,02$ для нарушения устойчивости сцепление в первом случае должно быть менее 0,22–0,26 МПа, во втором – менее 0,39–0,46 МПа. Такие значения для сцепления характерны для ледникового льда [Zoet et al., 2013].

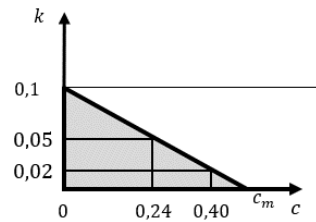


Рис. 6. Фазовая зависимость k от c

Рассмотренный механизм нарушения предельного равновесия активной части языка ледника аналогичен процессу скольжения капли воды на гладкой наклонной плоскости.

Механизм вязкопластического течения

Рассмотрим регулярное движение ледника, обусловленное вязкопластическим течением, а затем – переход к фазе пульсации. Как отмечено в настоящей статье, при толщинах ледника H до 300–360 м его можно рассматривать в рамках двухслойной модели – нижний вязкопластический слой толщиной h и верхняя недеформированная плита толщиной $H - h = 120$ м и в некоторых случаях, когда существенную роль играют эффекты на границе ледника с ложем, целесообразно добавить такую граничную прослойку (рис. 7). Если учесть, что температура с глубиной слоя возрастает, и что «подавляющая часть талых вод стеной стекает внутри ледника и под ним» (цит. по [Осипова, 2015]), то в модели необходимо ввести граничный слой между языком ледника и ложем. Обозначим толщину этого граничного слоя символом h_0 (рис. 7). Для таких ледников с «теплым» дном в основании, как показано в работе [Каримов, 2019], решение уравнения Навье-Стокса для вязкопластического течения слоя, расположенного на высоте z от наклонной плоскости, в установившемся режиме приводит к следующему выражению:

$$v = \frac{\rho g \cdot \sin \alpha}{\mu} \cdot \left\{ \left(Hh - \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\mu}{2\mu_0} \cdot h_0^2 \right\},$$

где μ и μ_0 – коэффициенты динамической вязкости для ледникового льда и граничного слоя, соответственно [Cuffey et al., 2010, Пфаффенгольц, 1993].

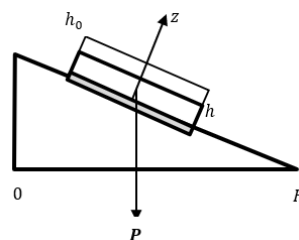


Рис. 7. Двухслойная модель ледника



Как показывает выражение (11), скорость в вязкопластическом слое возрастает по мере роста высоты его расположения по параболическому закону. Оценим по порядку величин, какие значения параметров μ , μ_0 и h_0 могут приводить к наблюдаемой скорости верхнего поверхностного слоя, равной 1 м/с. Подставим в (11) значения 1 м/с для скорости, $\rho \approx 900 \text{ кг/м}^3$ [Осипова, 2015], $\alpha = 6^\circ$, $H = 300 \text{ м}$, $h = 200 \text{ м}$. Тогда из (11) следует, что μ может быть значимым, если он равен $10^{13} \text{ Па}\cdot\text{с}$ по порядку величины. Чтобы μ_0 был значимым, необходимо, чтобы он был равным $10^9 \text{ Па}\cdot\text{с}$ для толщины граничного слоя 1 м и $10^{11} \text{ Па}\cdot\text{с}$ для толщины граничного слоя 10 м. Для вязкопластического состояния льда $\mu = 10^{13} \text{ Па}\cdot\text{с}$ – характерное значение [Войтковский, 1960, Пфаффенгольц, 1993, Цытович, 1973, Cuffey et al., 2010, Fowler et al., 1987]. В работе [Cuffey et al., 2010] отмечается, что динамическая вязкость льда может понижаться почти в 7 раз при его потеплении от -10°C до 0°C , т.е. на порядок величины, но не на 4 порядка, как должно было быть согласно оценке. Поэтому можно полагать, что граничный слой находится в промежуточном состоянии между вязкопластическим и талом – в виде желе, создающего смазку для скольжения ледника, например, водного глиняного раствора, на который указывается в работе [Hooke, 2005].

Механизм гидростатического разрыва резервуара на границе ледника с ложем

На важную роль воды и обводнения на границе с ледниковым ложем в динамике ледников и ледника Медвежьего, в частности, указывается в ряде работ [Осипова, 2015, Cuffey et al., 2010]. При этом глиняному водному раствору [McCarthy et al., 2017], либо водной прослойке [Jones, 1979], как смазке на границе ледника с ложем, отводится определенная роль в возникновении пульсации, анализируется гидравлический эффект воды [Fowler et al., 1987] и вклад порового давления [Kamb, 1987]. Гидравлический эффект возникает из-за вытеснения объема воды в замкнутом пространстве объема воды между телом ледника и ложем и, следовательно, за счет сил взвешивания, а избыточное поровое давление действует за счет сжатия этого объема воды. По-видимому, разрыв этого объема воды может приводить к разрушению и откалыванию большей части ледника с последующим возникновением лавины из ледниковых осколков – промежуточного состояния между регулярно движущимися ледниками и пульсирующими [Cuffey et al., 2010]. Однако, как отмечается в этой работе, остается неопределенным «сколько воды на ложе имеется в каждый данный момент, где она скапливается и как вытекает». А от этого в большой степени зависит насколько важны силы порового давления и взвешивания, которые могут действовать на активную часть ледника.

Оценим эффект гидроразрыва замкнутого объема воды на границе ледника с ложем, на который действует давление p от веса выше расположенной ледниковой массы или гидростатического давления от каналов вертикального дренажа талых вод, аналогичного давлению в опыте с бочкой Паскаля [Кравченко, 2016]. Обозначим символом d ширину замкнутого резервуара, показанного темным цветом на рис 8, Δh_0 – толщина резервуара, Δd – ширина контура длиной L , по которому происходит контакт между ложем и ледником и где действуют напряжения растяжения – распора (рис. 8). С ростом нагрузки от ледника растет напряжение растяжения, распора, действующего на разрыв резервуара по контуру контакта.

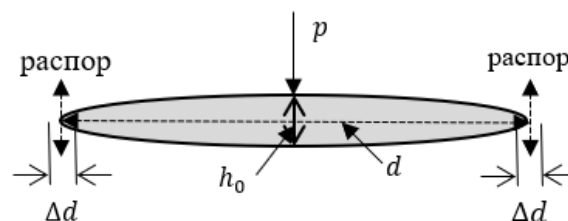


Рис. 8. Замкнутый резервуар воды на границе ледника с ложем



Примем во внимание, что контур в рассматриваемом случае имеет форму эллипса с длинной полуосью, равной $l/2$, и короткой – $d/2$ и учтем, что толщина резервуара много меньше его полуосей $h_0 \ll d/2 < l/2$. В состоянии покоя напряжение распора σ уравнивает поровое давление p :

$$(1/8)p\pi dl = \sigma L \Delta d. \quad (12)$$

Периметр эллипса L есть $L = 4lE(e)$, где $E(e, \pi/2)$ – полный эллиптический интеграл 2-го рода, e – эксцентриситет [Котляков и др., 2018].

Для приближенного вычисления периметра существуют несколько формул, воспользуемся следующей – для оценки пределов значений:

$$4\sqrt{(d/2)^2 + (l/2)^2} \leq L \leq \pi\sqrt{2((d/2)^2 + (l/2)^2)},$$

где $l/2$ – длинная полуось эллипса, в обозначениях настоящей статьи, $d/2$ – короткая [Jameson, 2014].

Из выражения (12) следует условие для критического напряжения разрыва резервуара по контуру:

$$\sigma = p \frac{\pi dl}{8L \Delta d}, \quad (13)$$

при превышении значения которого он произойдет.

Как видно из условия (13), напряжение разрыва по модулю может быть очень большим по сравнению со значениями давления p за счет узости ширины контакта Δd . Кроме того, известно, что прочность льда, как и мерзлых пород, на разрыв в несколько раз меньше, чем на сжатие [Пфаффенгольц, 1993, Цытович, 1973]. Подстановка значений для величин, входящих в (13), при высоте пульсирующей части ледника 200 м и ширине контура контакта 1 м приводит к оценке для напряжения $\sigma = 0,25$ МПа, и для случая ширины контакта 10 м – 0,025 МПа, которые сопоставимы с оценками прочности льда на разрыв по порядку величины, разными в зависимости от температуры, размеров образца, генезиса и других факторов.

Механизм лавинного обрушения основания ледника

В гляциологии придается большое значение зоне ледников в окрестности контакта с ложем поскольку там действуют наибольшие напряжения от нагрузки выше расположенных пород и высока степень обводнения из-за дренажа талых вод с приповерхностных слоев и талых вод собственно этой зоны, где может быть наибольшая температура – в ледниках с «теплым дном», или действовать большие гидростатические давления в заполненных водой или желеобразной массой полостях. Высокие напряжения переводят лед в перенапряженное состояние с разрушениями сплошности, к глыбовости и высокой пластичности. Тем самым понижается прочность льда в этой зоне. На многие порядки величин понижается сцепление, коэффициент вязкого трения льда по сравнению с состоянием неразрушенной структуры. Если такая трансформация происходит постепенно, например, при сезонных изменениях температур окружающей среды, то можно ожидать изменений скорости движения ледника, которые действительно широко наблюдаются. Если происходит лавинное нарушение сплошности, как это описывается в модели лавинного нарастания трещин – ЛНТ [Мячкин и др., 1975], то можно ожидать резкой потери устойчивости активной части ледника с переходом к пульсации или к ледниковой лавине с глыбовым характером движения.

Если предположить, что произошло резкое опускание массива ледника Медвежьего, объем активной части около 200 млн т [Яблоков, 2012] и средняя высота опускания 1 м, то из оценки для потенциальной энергии в соответствии с известными формулами [Хайкин, 1971, Кравченко, 2016] следует, что выделившаяся энергия W будет



равна около $2 \cdot 10^9$ Дж. Если перейти к магнитуде землетрясения M_S , определенной по поверхностным волнам [Захаров и др., 2021]:

$$\log W = 4,8 + 1,5 M_S, \quad (14)$$

то можно найти, что $M_S \approx 3$. Землетрясения с такой магнитудой надежно регистрируются с помощью современной сейсмологической аппаратуры в ближней эпицентральной зоне. Землетрясения с магнитудами до 5, происходящие в результате подвижек в ледниках, действительно регистрируются, и они получили название ледниковых [Tsai et al., 2008].

Не только подвижки в ледниках могут вызывать землетрясения, но, по-видимому, возможно, что наоборот, – на перенапряженное состояние зоны контакта ледника с ложем при определенных условиях может оказывать влияние сейсмичность. На Памире, который относится к высокогорным районам мира и где расположены большинство крупных ледников Таджикистана, в том числе Медвежий, очень высокая сейсмическая активность – здесь возможны землетрясения с магнитудой до 7,5 [Мирзоев, 1982]. Оценим напряжения, которые возникают в этой зоне контакта при сейсмических колебаниях в предположении, что тело ледника находится на упругом основании этой зоны, которая заполнена водой или водном глиняном желе в замкнутой полости (рис. 8). Уравнение для ускорения массы активной ледника M в вертикальном направлении z , согласно законам механики [Хайкин, 1971, Кравченко, 2016], представим в виде:

$$M\ddot{z} = -E \frac{z}{h_0} S, \quad (15)$$

где E – модуль всестороннего сжатия, упругости для жидкого наполнителя резервуара, S – площадь наибольшего сечения в горизонтальной плоскости резервуара, z – отклонение толщины резервуара от равновесного состояния, определяемого по равенству веса этой части ледника силе упругости согласно закону Гука:

$$Mg = -E \frac{\Delta h_0}{h_0} S, \quad (16)$$

где Δh_0 – упругое сжатие, определяющее положение, относительно которого совершаются колебания.

Решение уравнения колебаний (15) с учетом соотношения (16) приводит к следующему выражению для частоты колебаний ν :

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho h_0 H}} \quad (17)$$

Из (17) видно, что частота колебаний в принятом приближении не зависит от площади горизонтального сечения S . Модуль всестороннего сжатия для жидкостей обычно составляет $10^9, 10^{10}$ Па по порядку величины, для воды он равен $2,21 \cdot 10^9$ Па [Кикоин и др., 1976]. Подставив в (17) характерные значения физических величин, для толщины резервуара 1 м получим, что частоты собственных колебаний массы ледника M составляют 10 Гц по порядку величины. Такие частоты колебаний характерны для объемных сейсмических волн [Жарков, 1983]. Отсюда можно ожидать, что отклик наполненных резервуаров в основании ледника на сейсмические волны данных частот будет существенным и в случае резонанса колебания могут быть значительными по амплитуде, с последствиями в виде коллапса льда в граничной зоне основания ледника с последующей его пульсацией.

По-видимому, рассмотренный механизм влияния сейсмичности может быть одним из ответов на вопрос о сейсмической природе «ледниковых серджей», поставленный в работе [Cuffey et al., 2010].



Выводы

Физическое моделирование динамики ледника Медвежьего, которое выполнено в настоящей работе, подтверждает ведущую роль накопления массы активной части ледника в возникновении пульсации, однако конкретные механизмы пульсации могут быть разными.

Действие механизма роста объемного фактора, основную роль которого выполняют масса активной части и гравитация, и его превалирование над поверхностным, в виде сопротивления трения и сцепления, при достижении критических условий для нарушения равновесия приводит к потере устойчивости и пульсации ледника.

Механизм пластического течения основан на представлении о переходе ледниковой массы достаточно большой толщины в вязкопластическое состояние, при котором в результате трения, выделения тепла и резкого понижения коэффициента вязкости на границе ледника с ложем происходит его пульсация.

Механизм гидроразрыва резервуара, наполненного талой водой или водным глиняным желе в основании ледника, при достижении критических давлений внутри него приводит к резкому нарушению структурных связей на границе ледника с ложем и пульсации ледника.

Механизм обрушения активной части ледника Медвежьего в процессе увеличения ее массы в результате нарушения структурных связей в зоне его контакта с ложем под действием критических гравитационных нагрузок основан на мгновенной потере прочности основания ледника с последующим резким его оседанием, потерей устойчивости и развитием пульсации.

Сейсмичность может играть некоторую роль в возникновении пульсаций ледника Медвежьего. Например, в рамках модели резервуара, наполненного талой водой или водным глиняным желе в основании ледника, могут быть достигнуты резонансные условия для собственных колебаний активной части ледника, когда частоты землетрясений совпадают с частотами собственных его колебаний. Согласно проведенным оценкам для ледника Медвежьего резонансные частоты могут быть порядка 10 Гц.

Все механизмы, исследованные в настоящей работе, могут действовать и совместно, в сочетаниях друг с другом.

Список литературы

- Баратов Р.Б. и др. Земная кора и мантия Таджикистана. Душанбе: «Дониш», 1981, 284 с.
- Войтковский К.Ф. Механические свойства льда. М.: Изд-во АН СССР, 1960, 100 с.
- Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Баланс пульсирующего ледника Медвежьего как основа прогнозирования его периодических подвижек. МГИ, вып. 32, 1978, с. 161–170.
- Долгушин Л.Д., Осипова Г.Б. Пульсирующие ледники. Л.: Гидрометеиздат, 1982, 192 с.
- Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: «Наука», 1983, 416 с.
- Захаров В.С., Смирнов В.Б. Физика Земли. М.: «ИФРА-М», 2021, 328 с.
- Каримов Ф.Х. Пульсирующий ледник Медвежий в Таджикистане: состояние на август 2021 г. Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии, гидрологии и разработки месторождений полезных ископаемых Таджикистана и сопредельных территорий». Душанбе: ТНУ, 2022, с. 288–296.
- Каримов Ф.Х. Моделирование динамики ледников с «теплым льдом» в основании. Научный журнал ТНУ «Наука и инновация», Серия естественных наук, № 1, Душанбе: «Сино», 2019, с. 4–9.
- Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Наука, 1976, 480 с.
- Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: «Наука», 1977, 832 с.
- Котляков В.М., Десинов Л.В., Десинов С.Л., Рудаков В.А. Подвижки ледников Памира в 2020 году. Лед и снег, т. 61, № 3, 2021, с. 471–480.



- Котляков В.М., Чернова Л.П., Хромова Т.Е., Муравьев А.Я., Качалин А.Б., Тюфлин А.С. Уникальные циклические пульсации ледника Медвежий. Доклады РАН, т. 483, № 5, 2018, с. 547–552.
- Кравченко Н.Ю. Физика: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: «Юрайт», 2016, 300 с.
- Мирзоев К.М. Основные черты сейсмичности Таджикистана. Прогноз землетрясений, № 1. Душанбе: «Дониш», 1982, с. 14–37.
- Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясения. Кн.: Физика очага землетрясения. М.: Наука, 1975, с. 6–29.
- Осипова Г.Б. Пятьдесят лет исследований института географии РАН на леднике Медвежий, Западный Памир. Лед и снег, № 1(129), 2015, с. 129–140.
- Перов В.Ф. Селеведение. Учебное пособие. (Москва) М.: Географический факультет МГУ, 2012, с. 272.
- Рототаев К.П. Ледник Медвежий бунтует. В кн.: Победенные вершины. Годы 1961–1964. М.: «Мысль», 1966, с. 165–183
- Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: «Наука», 1971, 752 с.
- Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: «Высшая школа», 1973, 448 с.
- Яблоков А.А. Новое о двух хорошо изученных ледниках Памира. Лед и снег, № 1, 2012, с. 132–134.
- Геологический словарь. Под ред. Пфаффенгольца К.Н. М.: "Недра", 1993, т. 1, 488 с.
- Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Отв. ред. Федынский В.В., М.: «Недра», 1976, 527 с.
- Коллектив авторов. Литосфера Памира и Тянь-Шаня. Отв. ред. И.А. Фузайлов, Р.А. Мусин. Ташкент: «Фан», 1982, 248 с.
- Cuffey K.M., Paterson W.S.B. The Physics of Glaciers, 4th Ed. Amsterdam, Boston, Heidelberg: Elsevier, 2010, 702 p.
- Fowler A.C. A theory of glacier surges. Journal of Geophysical Research, 92, 1987, p. 9111–9120.
- Hooke R., Le B. Principles of glacier mechanics, 2nd Ed., Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005, 429 p.
- Jameson G.J.O. Inequalities for the perimeter of the ellipse. Mat. Gazette: Journal, v. 98, no 499, 2014, p. 227–234.
- Jones A.S. Stability of temperature ice caps and ice sheets resting on beds of the deformable sediment. Journal of Glaciology, 24, 1979, p. 29–43.
- Kamb W.M. Glacier surge mechanism based on linked cavity configuration of the basal water conduit system. Journal of Geophysical Research, 92(B9), 1987, p. 9083–9100.
- McCarthy C., Savage H., Nettles M. Temperature dependence of ice-on-rock friction at realistic glacier conditions. Phil. Trans. R. Soc. A375: 20150348, 2017, p. 1–18.
- Tsai V.S., Rice J.R., Fahnestock M. Possible mechanisms for glacial earthquakes. Journal of Geophysical Research, vol. 113, 2008, F03014, p. 1–17.
- Zoet L.K., Carpenter B., Scuderi M., Alley R.B., Anandkrishnan S., Marone C., Jackson M. The effects of entrained debris on the basal sliding stability of a glacier. J. Geophys. Res. Earth Surface, 118, 2013, p. 656–666.