



Seismic events registered in the glacier Perunika on Livingston Island

Dragomir Dragomirov¹, Gergana Georgieva¹, Lilia Dimitrova²

¹ Physics Faculty at Sofia University "St. Kliment Ohridski", Blvd "James Bourchier" 5, 1164 g.k. Lozenets, Sofia,
email: dragomirnd@uni-sofia.bg, ggeorgieva@phys.uni-sofia.bg

² National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences, "Acad. G. Bonchev" str., bl.3, 1113,
Sofia, Bulgaria, e-mail: lidim@geophys.bas.bg

Key words: icequakes, glacier, basal sliding, inner deformations, Livingston

Abstract

Glaciers can be perceived as huge rivers, that flow thank to gravitational forces. In response to driving stresses applied as a result of three independent processes occurring in the glacial flow – inner deformations, basal sliding and soft bed deformations the glaciers move. As a result of this movement, seismic events, called "icequakes", constantly occur in the ice. These events range in frequency, duration and strength. Seasonal variations in the number of detected events are observed. This paper will present data from seismic events registered by the Bulgarian seismic station (LIVV) on Livingston Island in Antarctica and the results from research of the seismic activity from glaciers in the region. The epicenters of events with clear phases are determined.

Сеизмични събития регистрирани в ледник Перуника на остров Ливингстън

Драгомир Драгомиров¹, Гергана Георгиева¹, Лилия Димитрова²

¹Физически факултет на Софийски университет „Св. Климент Охридски“, бул. „Джеймс Баучер“ 5, 1164 ж.к. Лозенец, София, имейл: dragomirnd@uni-sofia.bg, ggeorgieva@uni-sofia.bg

²Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска Академия на науките, ул. Акад. Г. Бончев, бл.3, София 1113, България, e-mail: lidim@geophys.bas.bg

Ключови думи: ледотресения, ледник, базално приплъзване, вътрешни деформации, Ливингстън

Резюме

Ледниците може да се гледат като големи реки, които „текат“ благодарение на гравитационните сили. В отговор на движещите напрежения ледниците могат да се преместват като резултат от три независими процеса в ледниковия поток – вътрешни деформации, базално приплъзване и деформации на мека скална основа. Благодарение на тези движения, постоянно възникват събития, наречени ледотресения, които се различават по своята честотна характеристика, продължителност и сила. Установени са сезонни изменения в броя на наблюдаваните сеизмични събития. Ще бъдат представени данни от сеизмична регистрация от българската сеизмична станция (LIVV), на о. Ливингстън в Антарктида и резултати от изследването на сеизмичната активност на ледниците в района. Направена е епицентрия по една станция на някои от събитията с ясни фази.

Въведение

Ледниците може да се разглеждат като големи реки, които текат благодарение на гравитационните сили. В горните части на ледника с времето се натрупва ледена маса, която трябва да се компенсира и това става с изтичане на маса в долната част на ледника (в зона, която се нарича аблационна). В аблационната зона ледът се топи или се отчупва. Скоростта на този балансиращ поток, от зоната на натрупване към зоната на аблация, зависи от количеството натрупана маса и от геометрията на ледника. Това натрупване става много бавно, затова скоростта на потока се променя също много бавно – с десетилетия, а понякога и с векове, макар че има и изключение при умерените ледници. Скоростта и движението на ледника зависят от няколко фактора – геометрията му (дебелина, повърхностен наклон), от физическите му характеристики (температура, плътност, състав), от формата на долината и дали



въобще има долина, от състоянието на земята под ледника (замръзнало или не, твърда скална основа или мек деформируем субстрат, както и от вида на отточните системи), от количеството лед, което плува около ледника и средните скорости на натрупване и аблация (количеството на натрупан на повърхността сняг и стопен в продължение на няколко години) (Clarke, 1987).

Повечето ледници имат сезонни промени в скоростта, като по принцип тя се увеличава по време на летния сезон, когато започва топенето. Това се получава, защото в началото на “топлия” сезон, отточните системи на ледника не са все още развити и водата се натрупва. С това се увеличава напрежението и се предизвиква движение на ледника. Движението на ледника представлява полупериодична осцилация, като се редуват дълги периоди на бавно преместване с къси периоди на бързо (10-1000 пъти по-бързо от бавното). В случаи на рязък скок в скоростта на ледника, се наблюдава бърз, кратък теч в голяма част от ледника. Тази рязка промяна на скоростта, от бавен теч или състояние на покой към повишена скорост на ледника, е признак за нестабилности в ледниковата система, които могат да бъдат предизвикани от климата, земетресения и др., но само при условие, че е близо до критично състояние.

Големи ледени маси (от няколко стотин метра до няколко километра в дебелина) могат да направят вдлъбнатина в литосферата и дори в астеносферата, която да достигне една трета от дебелината на ледника (Jiskoot, 2011).

Движение на ледниците

Движението на ледника зависи пряко от гравитационната сила, която го дърпа надолу. Скоростта на преместване зависи от приложеното върху него напрежение, от начина по който ледът може да се деформира, а също и дали самият ледник може да се движи спрямо скалната основа. Движението на ледника може да се представи като баланс между сили действащи на ледника – гравитационната сила и силата на съпротивление. Напрежението, предизвикано гравитационната сила зависи от средната дебелина и плътност на леда, както и от повърхностния наклон. При голям наклон ще се наблюдава удебеляване на акумулационната зона и изтъняване на аблационната зона, с което ще се увеличи напрежението предизвикано от гравитационната сила.

Съпротивителното напрежение се дължи на триенето на ледника със скалната основа, а базалното срязващо напрежение е свързано с дебелината на ледника, с наклона на повърхността и формата на долината на ледника и се изразява с формулата (Paterson, 1994):

$$(1) \quad \tau = f \rho g H \sin \alpha$$

Където ρ е плътността на леда (830-917 kg m⁻³, максимума в този интервал по принцип се взема за стандарт и представлява минимална порестост на ледника в дълбочина), g е гравитационното ускорение, H е дебелината на ледника, α е градиента на дебелината (dH/dx), което представлява повърхностния наклон при хоризонтална скална основа и f е безразмерен коефициент, който отразява формата на ледника и долината. Типични стойности за базалното срязващо напрежение са 10 kPa за ледникови потоци (както в Антарктида) и 100 kPa за долинни ледници (Алпийските ледници).

В отговор на движещите напрежения ледниците могат да се преместват посредством три независими процеса - вътрешни деформации, базално приплъзване и деформации на мека скална основа.

1. Вътрешни деформации

Ледът в ледниците е поликристал, който се държи като нелинеен пластичен материал при напреженията, които по принцип се наблюдават в ледниците. Когато върху този лед се упражни голямо напрежение за много кратко време - се образуват пукнатини по повърхността, които са често явление в ледниците. В случая, когато напрежението е по-малко, но продължително се наблюдава пластична деформация на леда. Такова напрежение, което се упражнява върху ледника при нормален ледников поток е 50-200 kPa.

В лабораторни условия Глен (цитат) е изследвал скоростта на деформациите в парче лед, подложено на различни напрежения и температури и емпирично извел закон на Глен, който свързва скоростта на промяна на срязваща сила на опън ($\dot{\epsilon}$) и приложеното напрежение (τ). Законът на поток на Глен изглежда така (Glen, 1955):



$$(2) \quad \dot{\epsilon} = A\tau^n$$

Където A е “параметър на мекотата” на леда, който зависи от температурата и активационната енергия. Константата n зависи от приложеното напрежение.

Като се интегрира сръзващата сила на опън по дебелината на ледника може да се направи профил на деформационната скорост.

2. Базално приплъзване

Когато ледниците не са замръзнали за скалната основа може да се наблюдава друг вид движение – приплъзване. Това приплъзване може да се наблюдава и без наличието на повърхностни пукнатини. Когато ледът тече и по неговия път има много издатини от скалната основа, то се наблюдава локално увеличение на напрежението. Това увеличено напрежение довежда до намаляване на температурата на топене на леда около препятствието и част от леда започва да се топи, при което ще се наблюдава приплъзване. Този процес се регулира от гладкостта на скалната основа (Weertman, 1957).

Съответно приплъзването може да се получи и при наличието на повърхностни пукнатини. Основно когато теренът под ледника е пълен с “препятствия” и тези препятствия са с достатъчно голям наклон, за да създадат достатъчно голяма разлика в скоростта на течението на горната част на ледника в сравнение с долната част, то се получават напуквания на повърхността на ледника (Liboutry, 1968).

3. Деформации на мека скална основа

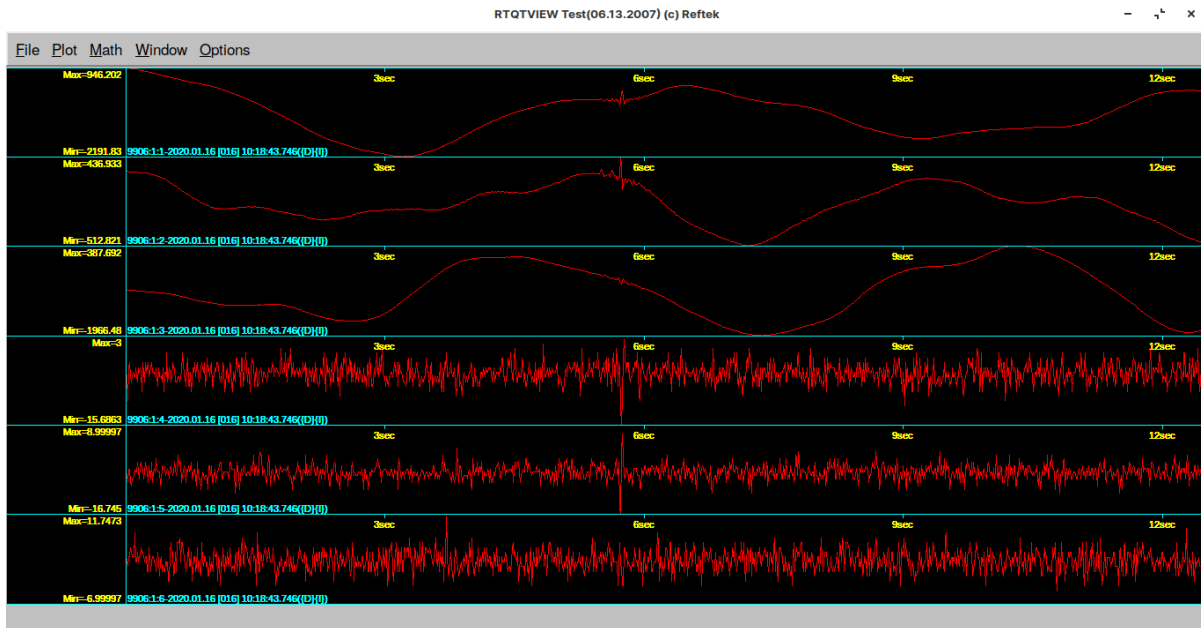
Ледниковата възглавница (скалната основа под ледника) представлява смес от седиментни скали, чиито размер варират от глина до големи скални късове. При съставените от глина и пясък подледникови възглавници има слабо триене между частиците и те лесно ще се деформират при приложено сръзващо напрежение, ако голяма част от порите им се запълнят с вода. За деформация от този вид е нужно над седиментите да стои ледник с голяма маса. Ако е достатъчно масивен ледника той може да “пропадне” с една-трета от дебелината си. Това явление не зависи само от силата упражнена от натрупания с годините лед, но и от порестостта на възглавницата, количеството вода, която се съдържа в тях и налягането, упражнявано от водата върху стените на порите (Alley et al., 1986).

Видове сеизмични събития регистрирани в ледниците

Движението на ледниците генерира различни видове събития, които се различават по своята честотна характеристика, продължителност и сила. Събитията, които ще разгледаме са ледотресения, предизвикани от повърхностни пукнатини; муленни тремори; stick-slip ледотресения. Представени са данни от българската сеизмична станция (LIVV) на о. Ливингстън в Антарктида. Само в последния сезон, за периода 09.01 – 27.01.2020г. са регистрира почти 5500 събития, които варират по честота и сила. Използван е софтуера `rtqt_view` (който се използва в дневната обработка на сеизмични данни от Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация, НОТССИ) за преглеждане на сеизмичните данни и свободният софтуер `Seismic Handler` ([Seismic Handler \(seismic-handler.org\)](http://SeismicHandler(seismic-handler.org))) за създаването на спектрограми и графики за движение на частиците.

Ледотресения предизвикани от повърхностни пукнатини

Пукнатини се образуват, когато напрежението в леда надмине критичната точка на еластичност. Издръжливостта на опън на леда зависи от температурата, плътността и структурата му. Пукнатини често възникват в крайните части на ледника, където латералните напрежения срещу стените на ледника не му позволяват да се движи. Това са най-многобройните събития, които се регистрират. Наблюдават се дневни и сезонни вариации при регистрирането им. През лятото, когато температурата е най-висока, броят им нараства в сравнение с другите сезони. Същата корелация се наблюдава и през деня, когато ледът е огрян от слънцето, броят им е по-голям в сравнение с през нощта. Този вид събития са с продължителност от 0-3 секунди и са често с малка амплитуда, но отчетливо първо встъпление (Davies, 2020, от интернет).



Фигура 1. Сеизмограма на ледотресение предизвикано от пукнатина.

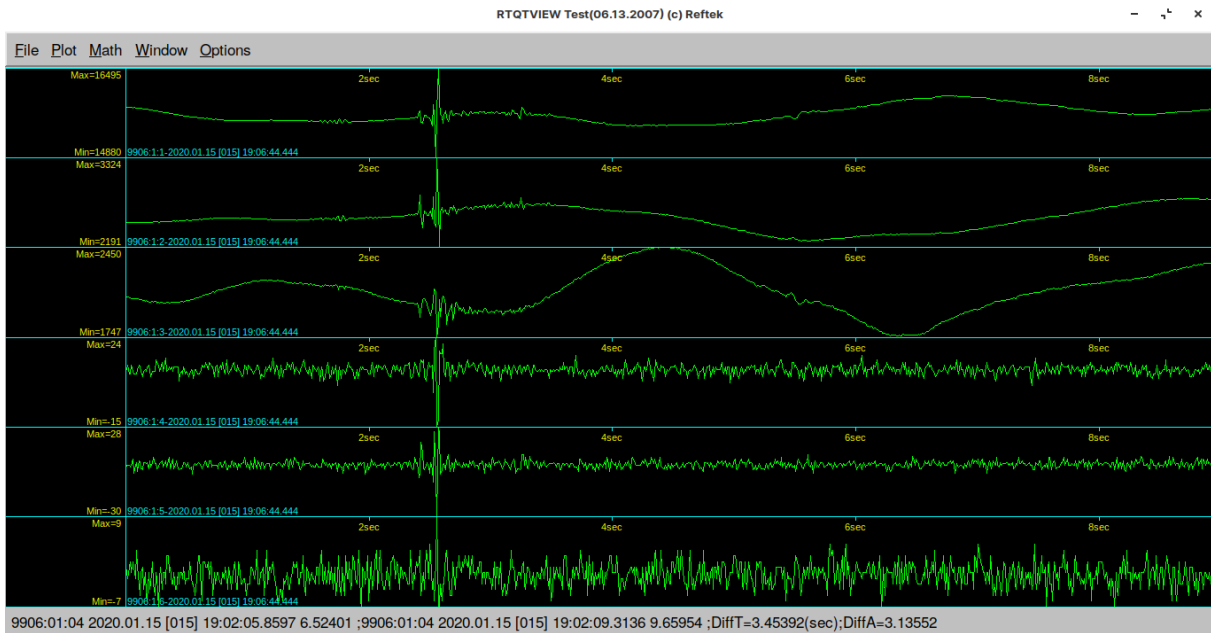
Муленни тремори

Мулените са вдлъбнатини, от които започват канали, проправени от водата, стигащи чак до основата на ледника. Тези канали се отварят в различни точки и там където това става променят налягането на подледниковата вода. Предполага се, че мулените се образуват от постепенно увеличаване на пукнатини, пълни с вода или от повърхностни езера. Мулените се образуват в точно определени места, в зависимост от топографията на скалната основа и могат да бъдат активни в продължение на няколко години. Муленът, който се състои само от една вдлъбнатина и от него тръгва канал, е най-простия тип. Предполага се, че мулените представляват серия от редуващи се каверна с канали, проправящи си път до ледниковото легло.

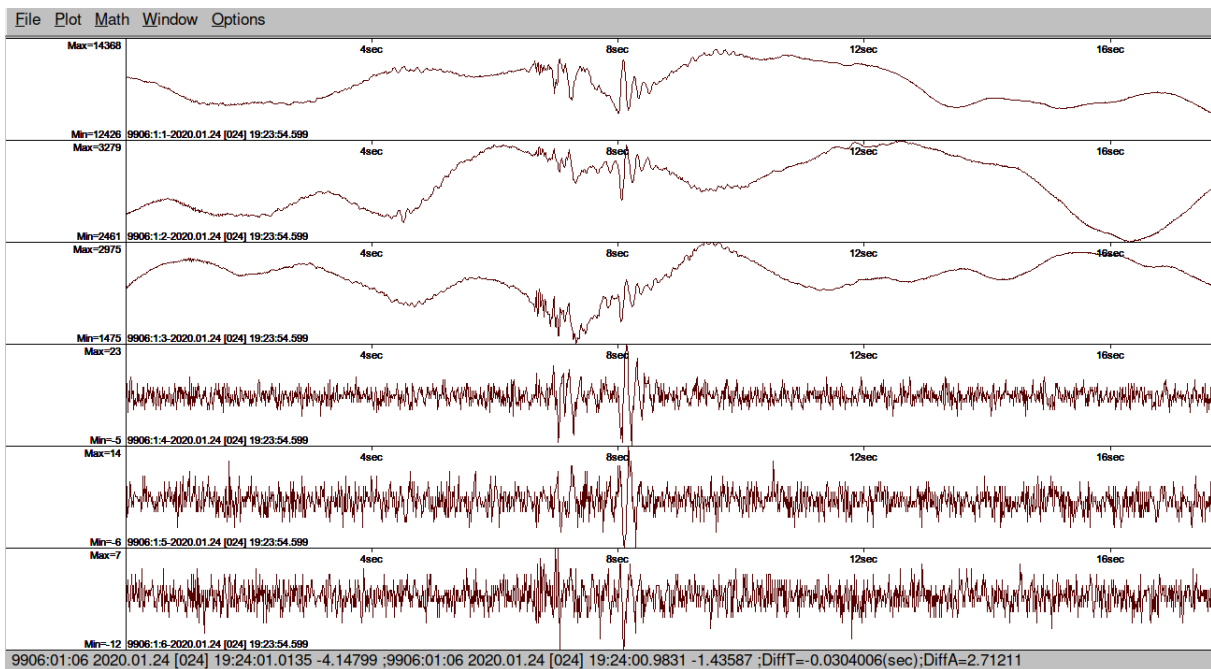
Събитията, които се генерират, са причинени от изтичането в мулените на големи количества стопена вода. Честотата на появата на тези събития, тяхната продължителност и честотна характеристика изглежда да зависят от количеството на водата в самия мулен. Характерно е, че Р и S вълните започват много плавно, няма рязко встъпление, както при земетресенията. Треморите в ледниците приличат повече на треморите създадени при вулканите, разликата е, че при тях има движение на магма, а не на вода (Röösli, 2016).

Stick-slip ледотресения

Водата под ледника може да има сериозен ефект върху самия него и динамиката му. В зависимост от капацитета на подледниковите системи за оттичане на вода, тя може да се задържа или много бързо да се оттича и по този начин да се стигне до повишаване или намаляване на напрежението. Затова базалното приплъзване е или подтикнато, или подтиснато. Под аблационната зона на умерените ледници (ледници, които са на границата на топене и водата съществува заедно с леда. При тях малки промени в температурата могат да доведат до сериозно промени в маса, обем и др.) подледниковите отточни системи обикновено се характеризират с промяната на сезоните. През зимата съществува неефикасна подледникова система за оттичане с голямо напрежение. През лятото разтопилата се вода от повърхността стига до ледниковото легло през пукнатини. В ледниковото легло тази вода тече по посока на хидравличния градиент (посоката в която налягането на водата намалява и хидравличния градиент измерва промяната в нивото ѝ за единица разстояние) и част от енергията се превръща в топлина. Затова тези канали, които са от лед бързо се разширяват и оттичането става по-ефективно и съответно налягането на водата спада. Тези канали се препълват само в по-топли дни през лятото и напълването им и увеличаването на водното налягането може да доведат до stick-slip движения на ледника (Walter, 2020).



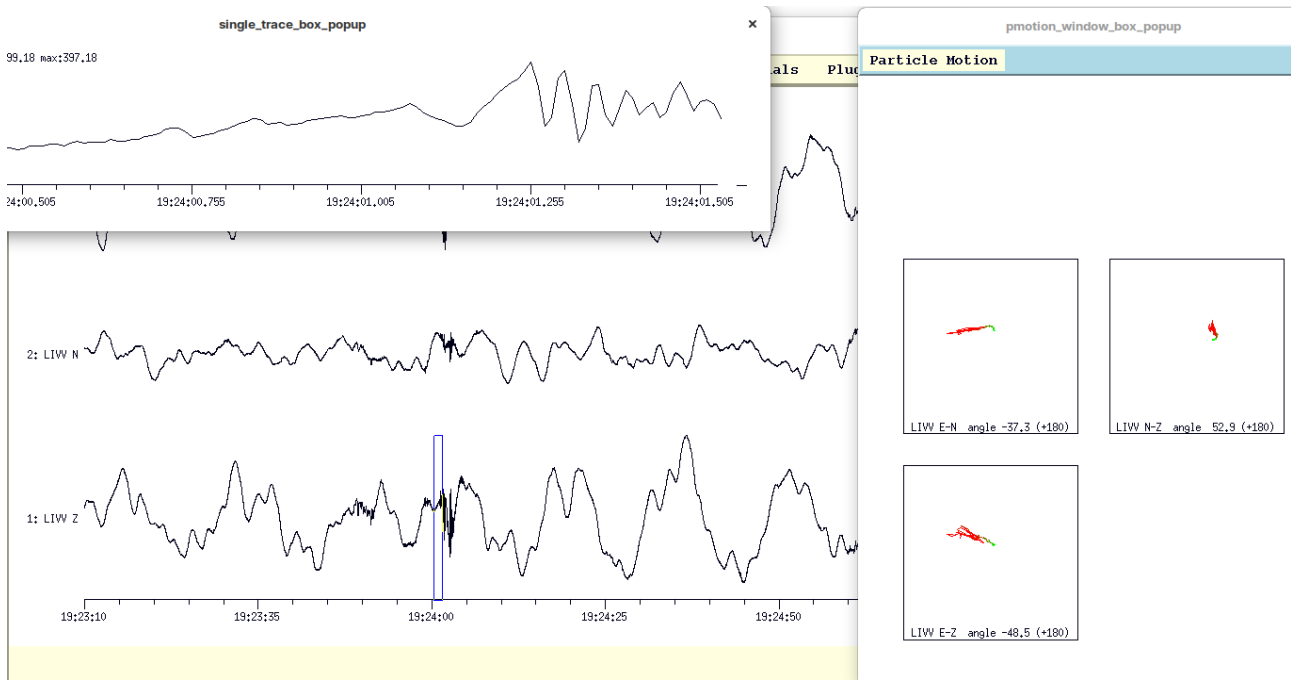
Фигура 2. Сеизмограма на stick-slip ледотресение (1).



Фигура 3. Сеизмограма на stick-slip ледотресение (2).

На двете сеизмограми се виждат две stick-slip събития. И двете встъпления P и S са отчетливи и може дори да се определи знака (компресия или декомпресия) на първото встъпление. Пакета на P вълната има по-голяма честота от този на S, който започва с голяма амплитуда и след това бързо затихва. Малко преди встъплението на директната S вълна може да се види, че пристига друга вълна – това е може би отразилата се под критичен ъгъл S вълна.

Събития като тези, с ясни встъпления, могат да бъдат локализирани по една станция по метода на Голицин (цитат), като се използва трикомпонентен сеизмичен запис. За локализацията се определя разликата $T_s - T_p$, за да се изчисли отдалечеността на събитието от сеизмичната станция, както и знаците и амплитудите на първите встъпления (компресия, декомпресия) на P вълната. Последното се прави, за да се пресметне ъгъла на обратния азимут. Определянето на обратния азимут може да се направи и от диаграмите на движението на частиците на P вълната, използвайки софтуера Seismic Handler.



Фигура 4. Stick-slip събитие. Вляво е сеизмограмата на събитието, а вдясно е графиката на движението на частиците по трите оси.

Заклучение

Изследването показва, че има няколко различни вида събития, които се случват в ледниците. Тези събития варират по честота, продължителност и сила. Наблюдава се сезонна зависимост на броя на регистрираните събития, както и дневна. Краткотрайните (0-3 секунди) ледотресения са най-многобройните и силно зависят от времето на деня и сезона. Треморите са събития, които продължават от няколко секунди до няколко минути. Имат неясни встъпления, което правят трудно определянето на отдалечеността им от станцията. Stick-slip събитията имат ясни встъпления, като Р пакета има по-висока честота от S, който затихва много бързо. Направената локализация по една станция, на събития с отчетливи встъпления, при която се използва знака и амплитудата на първите встъпления, може да се потвърди с тази направена по графиките за движение на частиците, направени със софтуера Seismic Handler.

Благодарности

Резултатите от настоящето изследване са получени по проект № 70-25-171 от 22.11. 2019г. , финансиран от Националния център за полярни изследвания.

Литература

- Alley, R. B., Blankenship, D. D., Bentley, C. R., and Rooney, S. T., 1986. Deformation of till beneath ice stream B, West Antarctica. *Nature*, 322(6074), 57–59.
- Clarke, G. K. C., 1987. Fast glacier flow: ice streams, surging, and tidewater glaciers. *Journal of Geophysical Research*, 92(B9), 8835–8841
- Glen, J. W., 1955. The creep of polycrystalline ice. *Proceeding of the Royal Society of London. Series A*, 228, 519–538.
- Jiskoot, Hester. (2011). *Dynamics of Glaciers*. 10.1007/978-90-481-2642-2_127.



- Lliboutry, L., 1968. General theory of subglacial cavitation and sliding of temperate glaciers. *Journal of Glaciology*, 7(49), 21–58.
- Paterson, W. S. B., 1994. *The Physics of Glaciers*, 3rd edn. Oxford: Pergamon, 480 pp
- Röösli, Claudia & Walter, F. & Ampuero, Jean Paul & Kissling, Edi. (2016). Seismic Moulin Tremor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 121. 10.1002/2015JB012786.
- Walter, F. & Gräff, D. & Lindner, F. & Paitz, Patrick & Köpfli, M. & Chmiel, Małgorzata & Fichtner, Andreas. (2020). Distributed acoustic sensing of microseismic sources and wave propagation in glaciated terrain. *Nature Communications*. 11. 10.1038/s41467-020-15824-6.
- Weertman, J., 1957. On the sliding of glaciers. *Journal of Glaciology*, 3(21), 33–38

[Structural glaciology - AntarcticGlaciers.org](https://www.antarcticglaciers.org/) (02.06.2021)