

Что такое тонкий лед!?

Алексей Медников, Alexey.Mednikov@gmail.com

Ноябрь, 2023

Материал подготовлен по книге Л. Франссона, *Ice handbook for engineers* [1], в которой в том числе цитируются работы советских исследователей природы льда С. Бернштейна [2], И. Панфилова [3], Н. Зубова [4].

Поздней осенью, зимой и весной в новостях мелькают сообщения, что кто-то провалился под лед. Повсюду можно встретить "Выход на лед опасен!", "Выход на лед запрещен!" и т.п. В чем же реальная опасность льда и как предотвратить неприятности на льду?

По природе лед это кристаллическое образование, причем достаточно прочное, способное выдержать автомобиль, многотонный грузовик или даже железнодорожный состав. Но это не всегда так, естественный лед бывает разный. Есть три наиболее часто встречающиеся структуры льда (рис.1):

- 1) натуральный лед из замерзшей воды;
- 2) снежный лед из растаявшего и смерзшегося снега, из шуги;
- 3) деградирующий весенний лед, или карандашный, трубчатый лед;

а также их сэндвич-комбинации (рис.2):

- a) черный-серый (чистый-снежный) сэндвич лед
- b) лед-вода-лед-снег – гибридный сэндвич



Рисунок 1. Структуры льда: 1) чистый плотный (черный, голубой) лед, 2) снежный пористый (серый) лед, 3) карандашный или трубчатый (темно-серый) весенний лед



Рисунок 2. Сэндвич-лед: а) чистый и снежный сэндвич лед, б) лед-вода-лед-снег сэндвич

Если натуральный лед плотный, прозрачный с голубоватым оттенком или черный от цвета воды подо льдом, то снежный лед более рыхлый, пористый, менее плотный, менее прочный и светло-серого цвета. Часто можно наблюдать сэндвич лед, когда снизу натуральный прозрачный лед, а сверху белый из растаявшего и замерзшего снега. Хороший пример такого сэндвича - замерзшие трещины, когда после снегопада подмораживает, лед разрывает, образуются трещины, из которых выходит вода и расплавляет снег вдоль трещины, снежная шуга смерзается и образуется серый

сэндвич вдоль трещины. На озерах ширина такого сэндвича метр-два, а на Финском заливе ширина сэндвич дороги может достигать до десятка метров. Наиболее опасным и коварным является весенний лед, который при обманчивой толщине в 30см может не выдерживать вес человека. Лучи солнца проникают насквозь, расплавляют лед изнутри. Лед становится как губка с водой, при этом полностью теряет свои упругие свойства, превращаясь в поле вертикально поставленных трубок, карандашей - стоит немного надавить, и эти карандаши проваливаются вниз.

Тем не менее с наступлением морозов так и хочется поскорее выйти на новый гладкий лед, прокатиться на коньках. Кто поосторожнее, те выжидают несколько морозных дней, а опытные, или нетерпеливые позволяют себе выйти на первый тонкий лед. Иногда это заканчивается провалом! Так на какой же лед выходить уже безопасно, а на какой лучше не высовываться?

Весенний лед коварен и, как замечено выше, требует большого опыта, требует знания погодных факторов, умения оценить риски и сделать правильный выбор, поскольку ключевую роль играет динамика деградации льда, его структуры.

Что касается нового осеннего, зимнего льда, то тут ключевую роль играет толщина льда, при необходимости учет динамики образования льда и наличия внешних факторов - снег, ветер, условия акватории - течения, глубины, характер дна, наличие ключей, впадающих вод и пр.

Толщина нового пресноводного льда в первом приближении по наблюдениям Л.Франссона пропорциональна квадратному корню из времени от момента появления льда. При воздействии факторов внешней среды для оценки динамики толщины льда в формулу добавляются корректирующие слагаемые, используются поправочные коэффициенты.

Новый лед под нагрузкой (например, рыбак или человек на коньках) это, по сути, упругая пластина под нагрузкой, лежащая на упругом основании (на воде). Эта задача деформации упругой пластины под нагрузкой впервые была решена Генрихом Герцем (учеником Гельмгольца и Кирхгофа) в 1884 году. В дальнейшем многие исследования упругих характеристик льда проводились в том числе и в Советском Союзе рядом известных институтов, что отражено в публикациях С.Бернштейна [2], И.Панфилова [3], Н.Зубова [4]. Упрощенное эмпирическое выражение для величины прогиба w льда толщиной h под нагрузкой P выглядит следующим образом [1]

$$w \approx 0,0065 P h^{-3/2}, \quad (1)$$

где вес P измеряется в Кн, толщина льда h в метрах и прогиб w - в миллиметрах (рис.3). При массе 100кг лед толщиной 10см прогнется всего на 2мм.



Рисунок 3. Прогиб льда под нагрузкой

Характеристический размер деформируемого участка льда представляется формулой

$$L^4 = E h^3 / [12 (1-\nu^2) p_w g] \quad (2)$$

где E модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона. После подстановки значений E , ν для льда, а также подстановки значений плотности воды ρ_w и ускорения g , величину L можно оценить по эмпирической формуле

$$L \approx 14 h^{3/4}, \quad (3)$$

где h измеряется в метрах, и при $h=0,1$ м или 10см, величина $L = 2,5$ м.

В предположении, что масса на льду будет сосредоточена равномерно на площади радиуса 25см (это, примерно, размер обуви взрослого), трещины на льду толщиной h появятся при нагрузке P_{cr}

$$P_{cr} \approx 0,33 h^2 \quad (4)$$

Таким образом, лед толщиной 5см начнет давать трещины и издавать пугающие звуки уже при массе человека 82,5кг, а лед толщиной 10см - при массе 330кг.

Исследования показали, что трещины на тонком льду при сосредоточенной нагрузке расходятся радиально, образуя также контурную трещину по окружности (Рис.4).

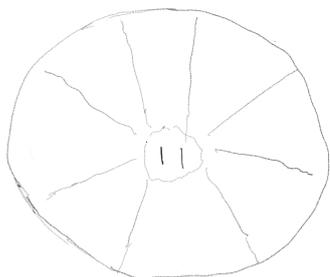


Рисунок 4. Геометрия трещин на льду под нагрузкой

Нагрузка P_u , при которой лед проломится (а человек провалится), аппроксимируется формулой

$$P_u \approx 0,88 h^2 \quad (5)$$

То есть, лед толщиной 5см сломается под массой 220кг, если этот вес рассредоточен на площадке радиуса 0,25м. Если радиус площадки будет 10см, то и предельные значения массы, которую выдержит лед будут меньше. Более точные значения веса для появления трещин и проламывания льда в зависимости от его толщины приведены для площади распределения нагрузки 80см^2 (что, примерно, соответствует распределению нагрузки от коньков) в Таблице 1 и на Рисунке 5.

h(м)	P_{cr} (кг)	P_u (кг)
0,01	3	9
0,02	12	33
0,03	24	73
0,04	40	128
0,05	60	198
0,06	84	283
0,07	111	384
0,08	142	499
0,09	176	630
0,10	213	775
0,11	254	936
0,12	298	1112
0,13	346	1303
0,14	396	1509
0,15	450	1730

Таблица 1. Зависимость предельных нагрузок от толщины чистого льда

Для снежного и гибридного льда предельные нагрузки будут ещё меньше, чем для чистого льда.

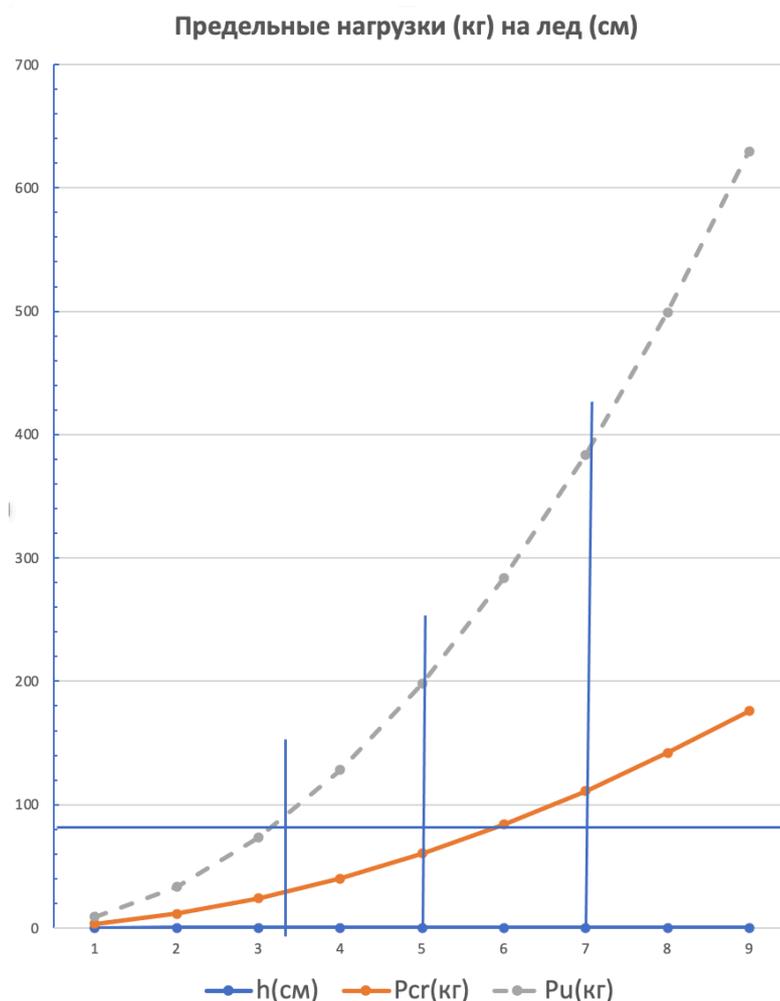


Рисунок 5. Зависимость предельных нагрузок на лед от толщины чистого льда

Из графика можно сделать несколько важных выводов.

- Прочность льда нелинейно зависит от его толщины, и начиная с толщины 10-15см лед практически безопасен для катания на коньках с одной оговоркой. Трещины, промоины, полыньи, открытая вода могут встретиться в любом месте и их наличие не зависит от толщины льда, а определяется условиями окружающей среды, особенностями водоема.
- Критическим значением толщины льда следует считать 5см, так как именно этот лед еще удержит большинство людей на коньках, несмотря на возможный треск от образующихся трещин.
- Лед толщиной 3см практически не держит человека на коньках, проламывается при массе 73кг, т.е. вес хрупкой девушки или подростка в полной экипировке, про крепких мужчин в экипировке говорить не приходится.

Лед 5см отличается от льда 3-4см лишь на 1-2см, т.е. разница небольшая, и невидимая. Важно, что любое незначительное изменение природных факторов - температура, снег, течение, пузыри со дна, ветер и профиль, история образования льда - может быть причиной неожиданного и неочевидного изменения толщины льда, что приводит к неизбежному провалу в воду. Таким образом, выходя на тонкий лед, а это лед около 5см, надо отдавать себе отчет, что в любой момент можно оказаться на льду 4-3см и в воде.

При выезде на экстремально тонкий лед ни в коем случае нельзя давать концентрированную нагрузку, т.е. переносить вес на одну ногу, а следует немедленно распределить нагрузку по как можно большей площади льда, поставив коньки на ширину плеч и немедленно начать плавный и интенсивный разворот в обратном направлении, при необходимости помогая пешней, как можно скорее вернуться на прочный лед.

У лыжников провалы под лед тем более опасны. Как показывают расчеты и подтверждает практика, «предупреждающие» трещины под лыжами появляются позже, чем под коньками, а проламывается лед будучи совсем тонким 2-3см, вылезти на который шансов крайне мало.

Наблюдения [1] показали, что при понижении температуры на -10°C лед сжимается, примерно, на 5см на каждые 100 метров (рис.6). Этим объясняется большое количество трещин на крупных водоемах. При этом трещины могут быть прикрыты снегом, или тонкой коркой снежного льда.

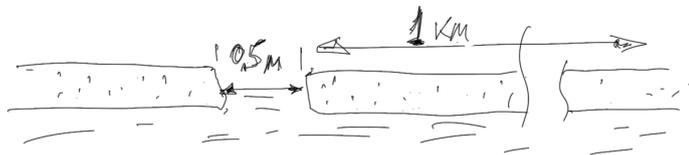


Рисунок 6. Сжатие и разрыв льда при охлаждении на 10°C

Из сказанного выше следует, что, планируя выход на неизвестный лед, помимо представления о характере и особенностях водоема, опытных людей в окружении, также разумно обеспечить три уровня собственной безопасности и уверенности:

- 1) наличие пешни (рис.7) для проверки льда, непосредственного предупреждения об опасности;
- 2) наличие пухлого рюкзака, шилец и веревки для выскакивания из воды, если уже провалился;
- 3) наличие сухой одежды, для своевременного переодевания, поскольку большинство трагедий случается не из-за купания, а по причине последующего переохлаждения.

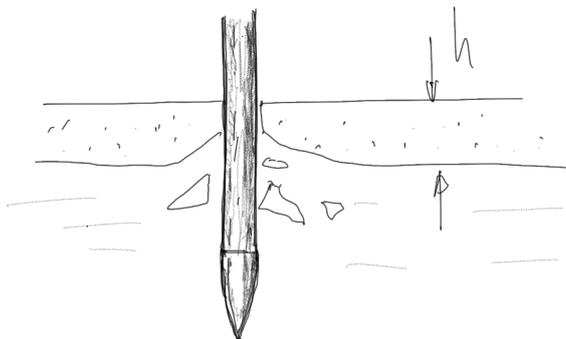


Рисунок 7. Проверка прочности и толщины льда пешней, наконечник делает снизу воронку, что затрудняет точное измерение толщины льда.

Походы на коньках по природному льду — это большая привилегия, которую могут себе позволить немногие. Но эта привилегия подчас связана с неопределенностью, с природной изменчивостью, с риском, и принимать риски, минимизировать их или уходить от рисков это наш выбор.

Литература

- [1] Fransson L., Ice handbook for engineers, Lulea University of technology, 2009
- [2] Bernstein, S. 1929. The railway crossing. Trudy Nauchno-Technicheskogo Komiteta Narodnogo Komissariata Putei Soobshcheniaya, Tom 84, 36-82 (Translation: Kerr, A. 1976. The bearing capacity of floating ice plates subjected to static or quasi-static loads. J. of Glaciology Vol 17, No 76, 1976.)
- [3] Панфилов И., 1960. Экспериментальные исследования грузоподъемности ледяного покрова. Известия ВНИИГ, Ленинград, Том 64, 101-115.
- [4] Zubov, N. N. 1938. The maximum thickness of perennial sea ice. Meteorologiya i Gidrologiya, No 4, 123-131.