

Операционная автомодельность: Динамика движения ледников.

Большинство современных теоретических трудов по гляциологии и теории движения ледников [1-3] используют систему *несложных* уравнений для моделирования вязко-пластичной динамики их течения, а именно:

- уравнение *неразрывности* (сплошной среды),
- уравнение баланса *массовых/сил инерции и движущих сил* (уравнение импульсов),
- уравнение *баланса тепла* (изменение температуры ледника).

Но совершенно очевидно, что первые два уравнения не могут быть использованы для адекватного моделирования динамики течения ледников, потому что:

- уравнение *неразрывности не выполняется* во всем массиве ледника (*причина: в теле ледника при его движении постоянно возникают трещины, разломы и пустоты, заполненные талой водой/инородными телами*),
- уравнение баланса *массовых/сил инерции и движущих сил* (*причина: при движении ледника, упругие деформации трансформируются в вязко-пластичные, т.е. происходит необратимая потеря импульса различных слоев при их неупругом взаимодействии друг с другом*),
- уравнение притока тепла *необходимо модернизировать* (*сохранив часть описывающую трансформацию внутренней энергии/энтальпии, и добавив преобразование потенциальной энергии – в кинетическую, на протяжении всего пути следования ледника*).

В работе [4] описан механизм трансформации энергии упругих деформаций в вязко-пластичные (деформации), *при сходе лавин с горных массивов*.

Подобный механизм остается актуальным также *и для ледников*, за исключением двух важных обстоятельств:

- 1) Ледник (*слои льда, его составляющие*) – рассматриваются в массе как *неньютонова жидкость*. Это означает что напряжения вязко-пластических деформаций связаны со скоростями деформаций соотношениями Глена [2]:

$$\frac{\sigma}{\mu_n} = \left(\frac{d \Delta}{d t} \right)^n$$

- где $n = 1, 2, 3$ (*если $n = 1$, то это – модель ньютоновой жидкости*), обычно $n = 3$; здесь σ - касательное напряжение в движущемся слое, Δ - возникающая при движении деформация, $\Delta' = d \Delta / d t$ – скорость деформации; μ_n – соответствующий коэффициент динамической вязкости для каждого конкретного n .

- 2) Ледник (*слои льда, его составляющие*) – не останавливается как лавина у подножия гор, а продолжает двигаться далее.

Соответственно, Δ_{finish} - *пластическая деформация, возникающая в движущемся слое при его торможении* - отсутствует и/или не учитывается при моделировании движения ледника.

В сделанных предположениях, формула (1.5) в работе [4] преобразуется следующим образом (*корректировка: $\alpha = \alpha(t)$, при дифференцировании $\cos \alpha \rightarrow \sin \alpha$*):

$$\Delta'' = g \cdot \sin \alpha - \frac{\mu_n}{\rho \cdot d} \cdot (\Delta')^n$$

- здесь g - ускорение свободного падения, α - угол наклона, под которым движется ледник (к горизонтальной поверхности); ρ - плотность льда ($\sim 900 \text{ кг/м}^3$); d - характерный размер ячейки гранулы льда, при его движении ($10 - 90 \text{ мкм}$, в среднем 50 мкм).

Совершенно очевидно [5], что классификация последнего дифференциального уравнения (относительно скорости деформации Δ), зависит от конкретного значения n :

- при $n = 1$ это линейное уравнение,
- при $n = 2$ - это уравнение Риккати,
- при $n = 3$ - это будет уравнение Абеля (Риккатиетового типа).

Это означает, что при $n = 2, 3$ искомое решение существует непрерывным образом только в определенном диапазоне значений t , или, другими словами [4], претерпевает разрыв при некотором $t = t_0$. Соответственно, скорость деформации Δ' течения ледника *может меняться внезапно, скачком*.

И подобные внезапные изменения скорости действительно наблюдаются [3]:

“В связи с детальным изучением и хозяйственным освоением высокогорных территорий человеку все чаще приходится сталкиваться с грозными явлениями природы, одним из которых являются **внезапные продвижения ледников**.

... О быстрых подвижках отдельных ледников, которые не имели прямой связи с общим изменением климата, было известно давно. Сохранились драматические описания ледовых катастроф.

В начале прошлого века газеты и журналы Российской Империи сообщили о катастрофическом ледяном обвале на Кавказе, в верховьях реки Геналдон. По свидетельству местных жителей, с первых чисел мая 1902 г. со стороны ледника Колка слышались постепенно усиливавшийся треск льда и шум камнепадов. К вечеру 3 июля ледник начал быстро двигаться и превратился в гигантский ледово-каменный сель, со страшным грохотом прокатившийся вниз по долине и сметавший все на своем пути.

... прошло 67 лет, и осенью 1968 г. ледник Колка вновь дал о себе знать, хотя на этот раз землетрясения поблизости отмечено не было. Конец ледника, представлявший собой хаотическое нагромождение обломков льда, камней и грязи, за 3 месяца продвинулся на 4,6 км, создав реальную угрозу курорту Кармадон и селениям в долине р. Геналдон.

В 1953 г. ледники Куранкар, Нан и Кутсумбур, расположенные в горах Каракорума, начали быстро двигаться и, слившись, заполнили дно долины р. Кутях, образовав новый ледниковый язык – ледник Кутях, который продолжал продвигаться вниз по долине со средней скоростью 113 м в сутки, сметая росшие в долине деревья и постройки. За 3 месяца конец ледникового языка продвинулся на 12 км и перегородил р. Стак.

В Исландии периодически, каждые 80–90 лет, наступает большой ледник Бруарйекулдль. Конец ледника продвигается и во время общего климатического оледенения и когда большинство ледников Северного полушария отступает. Ледник двигался в 1625, 1720, 1810, 1880 и 1963–1964 гг. За время между подвижками край ледника возвращался в исходное положение, а его поверхность выравнивалась. В 1963 г. скорость движения льда здесь временами достигала 4 м/час, движение было неравномерным, резкие толчки чередовались с задержками. **Вся область расхода ледника** и большая часть области аккумуляции были **раздроблены многочисленными трещинами** на призматические блоки. К августу 1964 г. фронт ледника протяженностью 45 км продвинулся на 8,3 км.

Наиболее значительное известное продвижение ледника произошло на Северо-Восточной Земле (Шпицберген), когда между 1936 и 1938 гг. часть склона Южного ледяного поля сползла на 20 км в море, образовав сильно разбитый трещинами ледниковый язык шириной 30 км, площадью 400–500 км², который получил название «Бразвельбре» (быстро растущий ледник).

Аналогичных подвижек выявлено довольно много. Только на территории Северной Америки обнаружено 204 случая быстрого продвижения ледников, в том числе 35 подвижек произошло после 1960 г. Насчитывается около 70 ледников в горно-ледниковых районах Средней Азии, Кавказа и Камчатки, на которых в разное время замечено продвижение концов. Подвижки ледников зарегистрированы в Исландии, на Шпицбергене, в Южной Америке, в Альпах, Гималаях, Каракоруме и Новой Зеландии; не исключена возможность подвижек ледников в Гренландии и Антарктиде.”

... существует другая точка зрения, согласно которой периодические быстрые подвижки ледников считаются явлением закономерным, обусловленным неустойчивым динамическим состоянием самих ледниковых систем. ... **Скачкообразные продвижения концов таких ледников с увеличением скорости движения льда в 10–100 раз** ... – это лишь внешнее выражение разрядки напряжений, длительное время накапливавшихся в теле самого ледника.”

References:

1. Н.В.Короновский, А.Ф.Якушова. Основы геологии // Геологический факультет МГУ: <http://web.ru/db/msg.html?mid=1163814&uri=part08-02.htm>.
2. Паттерсон У.С.Б. Физика ледников: перевод с английского. М.: Мир, 1984.
3. Пушкарь В.С., Черепанова М.В. Отв. ред. И.С. Майоров. Экология: природные катастрофы и их экологические последствия (Учебное пособие) // Сайт цифровых

учебно-методических материалов ВГУЭС, методическое обеспечение учебного процесса: http://abc.vvsu.ru/Books/ekolog_prirod_katastrofy/page0005.asp.

4. Ершков С.В. Реологическое уравнение сыпучих сред при свободном скольжении // МГУ (доклады семинара по темпорологии: http://www.chronos.msu.ru/RREPORTS/yershkov_reologicheskoye.pdf).
5. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1971.