

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Крапивнер Р.Б. Несовместимость теории четвертичных материковых оледенений с физическими свойствами ледниковых покровов // Арктика и Антарктика. 2025. № 4. С. 89-110. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.75969 EDN: KRDNPZ URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=75969

Несовместимость теории четвертичных материковых оледенений с физическими свойствами ледниковых покровов

Крапивнер Рудольф Борисович

доктор геолого-минералогических наук

главный геолог, ЗАО Гидрогеологическая и геоэкологическая компания "ГИДЭК"

105203, Россия, г. Москва, ул. Первомайская, 126 подъезд 2, оф. ЗАО Гидрогеологическая и геоэкологическая компания

✉ krapivner@inbox.ru



[Статья из рубрики "Экзогенные процессы в холодных равнинных и горных регионах"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.4.75969

EDN:

KRDNPZ

Дата направления статьи в редакцию:

22-09-2025

Дата публикации:

07-10-2025

Аннотация: Предметом исследований является ледниковая теория, единственная из выдвинутых еще на заре развития науки (в первой четверти XIX века) глобальных геологических идей, сохранившаяся до нашего времени. В соответствии с ней в недавнем геологическом прошлом значительная часть материковой суши покрывалась ледниками, геологическая деятельность которых отобразилась в строении рельефа, верхней части осадочного покрова и распространении приповерхностных деформационных структур. Поскольку практические потребности геологии опережали развитие гляциологии как науки, основные положения формировавшейся ледниковой теории базировались на постулатах с феноменологическим обоснованием на уровне геологической науки второй и третьей четвертей XIX века. Важные детали физических

свойств и истинная причина движения глетчерных льдов была установлена гляциологами лишь в середине XX века, когда геологическая ледниковая теория получила практически безоговорочное признание наук о Земле. Вследствие этого проверка совместимости постулатов ледниковой теории с основными положениями современной гляциологии выполнена не была (инерция мышления). Предлагаемая статья посвящена этой проверке. Приводятся сведения о кристаллической решетке и физических свойствах глетчерного льда, производящих его самопроизвольное движение и способность к сопротивлению этому движению со стороны пород ложа. Современные российские и зарубежные научные сообщества полностью и безоговорочно поддерживают ледниковую теорию, которая прочно утвердилась во всех науках о Земле. На основе существующей парадигмы четвертичного периода формируются палеогеографические представления, осуществляется геологическое картирование и ландшафтное районирование, разрабатываются сценарии изменения природной среды при различных тенденциях изменения климата. Между тем, существование постулируемой ледниковой теорией латеральной компоненты гравитационного давления ледника и, вследствие этого, перемещение базальных слоев ледника по плоскостям надвигов, их крупномасштабное скольжение относительно поверхности ледникового ложа, а также любые проявления гляциотектоники с образованием дислокаций и аллохтонных блоков пород ложа (отторженцев) противоречит физике глетчерного льда. Ледник не деформирует и не разрушает препятствия на своем пути, а обтекает их. Самопроизвольность течения глетчерного льда служит главной причиной его ограниченной способности к глубинной эрозии, которая сводится к сглаживанию неровностей рельефа ложа с полировкой и штриховкой его поверхности.

Ключевые слова:

ледник, ледниковая теория, гляциология, физические свойства льда, энергия, причина движения ледника, релаксация напряжения, деформация, надвиг, ледниковая эрозия

Введение

Название предлагаемой вниманию читателя статьи обусловлено следующим высказыванием одного из ведущих российских гляциологов В. М. Котлякова: «В последние годы удалось проникнуть в суть ледниковых процессов, познать физику этого природного явления. Гляциология XIX и начала XX века – наука географического профиля, современная гляциология – это прежде всего отрасль геофизики» [7, с. 97]. Исторически сложилось так, что к середине XX века, когда гляциология установила физическую природу движения глетчерного льда [13, 31], феноменологическая теория материковых оледенений, далее называемая ледниковой теорией, уже многие десятилетия функционировала как успешное учение. В научной и практической деятельности сформировалась группа специалистов, изучающих состав и строение четвертичной ледниковой формации обособленно от проблем дочетвертичной геологии. На Западе их иногда называют гляциогеологами, так для краткости они будут именоваться далее. На «гляциогеологических» разрезах экспонированный в обнажениях или вскрытый бурением вертикальный интервал распространения дочетвертичных отложений, как правило, изображается покрытым косой штриховкой. Она указывает на то, что тектоническая структура дочетвертичного субстрата гляциогеолога не интересует, так как он априори исключает наличие какой-либо генетической связи между

упомянутой структурой и возможными нарушениями нормального залегания четвертичных слоев. А между тем, такая связь существует. Методы ее обнаружения базируются на тектонофизическом анализе системы «напряжения-деформация» в вертикальном разрезе от поверхности кристаллического фундамента до топографической поверхности [16], на которую возникающие на отдельных участках земной коры тектонические напряжения в конце концов релаксируют. В приповерхностных горизонтах платформенного осадочного чехла установлено два главных типа «бескорневых» нарушений нормального залегания слоев, принимаемых за проявления гляциотектоники: 1) вторичные разрывные и складчатые структуры областей динамического влияния разломов фундамента и 2) крупные складки нагнетания (в том числе диапировые или криптодиапировые) слоев, материал которых обладает минимальным по сравнению с нижележащими слоями периодом релаксации напряжений. Присутствие таких структур на площадях постулируемых четвертичных оледенений установлено на Камчатском полуострове - общеизвестном районе с высокой неотектонической активностью, а также на севере Западной Сибири и Европейской России, включая Баренцевский шельф [10 др.], где подобная активность априори подразумевается отсутствующей. Опубликованные по этой проблеме выводы гляциогеологами не опровергаются, а просто не принимаются во внимание. Умозрительные палеогеографические реконструкции природной среды, базирующиеся на феноменологической ледниковой теории XIX столетия, продолжают умножаться несмотря на то, что они противоречат основным положениям обновленной теоретической гляциологии, резко ограничившей возможности геологической деятельности умеренных и холодных ледников.

1. Состояние проблемы

Профессиональные представители гляциологии как «отрасли геофизики», обычно, не знакомы с масштабом геологической деятельности, приписываемой четвертичным ледниковым щитам в рамках геологической ледниковой теории, и, поэтому, относятся к ней, как к исторической «данности». В России это во многом обусловлено авторитетом П. А. Шумского одного из ведущих советских гляциологов, который в своей популярной монографии [19] дискутирует с набиравшими популярность новыми представлениями о физике льда [31], ставшими вскоре основой современной теоретической гляциологии. В главе «Напряжения и движение в естественных ледяных телах» он пишет: «Вертикальное давление p , создаваемое весом льда на глубине z под поверхностью составляет $p = \delta \cdot z$, где δ – объемный вес льда. При линейной зависимости деформации (ε) от давления коэффициент бокового давления определяется уравнением деформации Пуассона $\varepsilon = \sigma / (1 - \sigma)$. Коэффициент Пуассона σ для ледникового льда равен 0.361, откуда $\varepsilon = 0.565$. Следовательно,... 56.5% вертикального давления во льду передавалось в горизонтальном направлении, и боковое давление p_1 на глубине z составило бы $p_1 = 0.565 \cdot \delta \cdot z$ » [19, с. 319]. «При всех изменениях формы и уклона ложа лед не может приспосабливаться к новым условиям не медленно, как жидкость, путем изменения скорости течения, уклона ложа и размеров поперечного сечения, т.е. глубины потока.... Поэтому изменение условий течения... лишь частично вызывает изменение мощности льда и соответствующее увеличение (или уменьшение) скорости течения, как в жидкости. Остальная часть продольного напряжения передается линейно, как в твердом теле, так что каждый данный участок ледника толкает расположенный впереди или тянет за собой расположенные позади участки, находящиеся в условиях иной скорости течения. Но такой дополнительный внешний для данной части ледника импульс лишь частично может вызвать ускорение ламинарного течения, а в основном превращается в глыбовое скольжение по ложу [19, с.336]. «Следовательно, каждое изменение условий

течения ледника ведет к частичному переходу пластического течения в глыбовое скольжение.... Несовершенство текучести льда, отличающее его от текучести жидкости, в процессе течения порождает движение глыбового типа – глыбовое скольжение по ложу, переходящее от части (вследствие малой прочности льда) в скольжение серии пластин по внутренним плоскостям разрывов» [\[19, с. 337\]](#).

На подобных идеях базируются основные положения геологической ледниковой теории. В соответствии с ними: 1) причиной движения ледников является климатически обусловленное продольное напряжение, которое продуцировано латеральной составляющей гравитационного давления ледника на ложе, максимального в области питания, 2) из-за этого основной формой движения глетчерного льда является не ламинарное течение, а глыбовое скольжение по ложу. Перечисленные постулаты породили представления о ледниковом напоре (бульдозерный эффект), гляциотектонике, краевых формах рельефа (морены напора и т. п.). Ссылки на монографию Шумского придают публикациям ведущих гляциогеологов эффект обоснованности данными гляциологии [\[5, 12, 13\]](#).

Вопреки мнению Шумского (см. выше) ледник представляет собой «идеально текучее твердое тело» [\[17\]](#), что обусловлено строением его гексагональной кристаллической решетки, отличающейся от большинства других кристаллических тел водородными структурными связями между молекулами. Атомы кислорода, азота и фтора способны отдавать один из протонов другим атомам, приобретая электроотрицательный заряд, а атом водорода подобно многим другим химическим элементам способен их принимать, становясь электроположительным. В кристаллической решетке льда каждый атом кислорода окружен четырьмя атомами водорода, из которых два соединены с ним ковалентной связью, образуя молекулу H_2O , тогда как два других находящихся в несколько раз дальше, обеспечивают структурную связь между молекулами льда, называемую водородной. Каждый из составляющих эту пару атомов водорода связан с атомами кислорода двух разных молекул (рис. 1). Атомы кислорода расположены в узлах кристаллической решетки упорядоченно образуя правильные шестиугольники, а атомы водорода занимают самые разные положения вдоль межатомных и межмолекулярных связей. Это подчеркивает «необычность» льда как твердого тела, в котором, как правило, все атомы расположены либо упорядоченно (кристаллическое тело), либо хаотически (аморфное тело). Кроме того, в ледяном кристалле между молекулами присутствуют пустоты, по объему немного превышающие размеры молекул H_2O . Из-за этого плотность льда меньше, чем его жидкой фазы, тогда как у большинства других веществ замерзание увеличивает плотность.

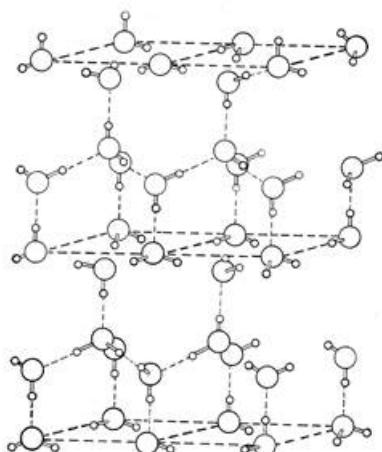


Рис.1. Кристаллическая структура льда [\[16\]](#). Крупные круги – атомы кислорода, мелкие – водорода.

Прочность водородных связей на порядок величины ниже ковалентных, что в сочетании с их способностью быстро восстанавливаться определяет физический механизм латерального расположения ледника. Это четко сформулировано известным гляциологом и геофизиком Д. Дрюри: «Течение больших масс льда вызывается силой тяжести. Их гравитационному разваливанию путем крипа препятствуют слабое сопротивление атомных сил (водородные связи Р. К.) и более существенные силы трения на ледниковом ложе. Движущей или объемной силой служит удельный вес льда $\rho \cdot g$, где ρ – плотность, g – гравитационное ускорение» [\[27\]](#). **Таким образом, в современной гляциологии принято, что причиной движения глетчерного льда мощностью h является $\rho \cdot g$, а не $\rho \cdot g \cdot h$, как полагают гляциогеологи, или в обозначениях, принятых П. А. Шумским, δ, а не δ·z, как считал П. А. Шумский** [\[19\]](#). Это значит, что под любой самой малой, но длительно действующей нагрузкой, в том числе под действием собственного веса лед может менять свою форму без разрушения или изменения объема, как бы течь, что сближает его с вязкой жидкостью. Линии тока расположенного ледникового щита, изображаются без иллюстрации сопровождающих это расположение деформаций зерен льда в зависимости от глубины и расстояния от ледораздела [\[1, с. 108, и др.\]](#). Игнорирование упомянутого фактора приводит к ошибочной интерпретации (в том числе некоторыми профессиональными гляциологами) динамической природы деформационных структур в теле ледника, особенно вблизи его подошвы.

Зерна льда ледниковых щитов обладают компонентами движения, направленного вниз по вертикали и в стороны по горизонтали. В связи с этим в верхней части ледника и вблизи его подошвы обособляются зоны сдвига, соответственно, чистого (вертикальное расплывание зерен) и простого (скашивание прямого угла). В первом случае плоскости «ab» кристаллов приобретают ориентировку субпараллельную границе раздела ледник / ложе, а оси «a» и «b» вытягиваются по латерали, во втором, также происходит вытягивание зерен и их ориентировка под все меньшим углом навстречу направлению движения ледника. В промежутке между упомянутыми зонами оба типа деформации смешиваются (рис. 2). Факт гравитационного расположения ледников путем увеличения латеральной протяженности его годичных слоев за счет прогрессирующего с глубиной уменьшения их толщины доказывается результатами бурения в Гренландии и в Антарктиде. Так, в скважине близи ледораздела Гренландского ледникового щита, интервал 0–1624 м накопился за 11,5 тыс. лет при средней толщине годичного слоя ~14 см, интервал 1624–2788 м накапливался 98,5 тыс. лет, причем средняя толщина годичных слоев (~1,2 см) уменьшилась за счет вертикального сжатия и деформации простого сдвига почти в 12 раз [\[26\]](#).

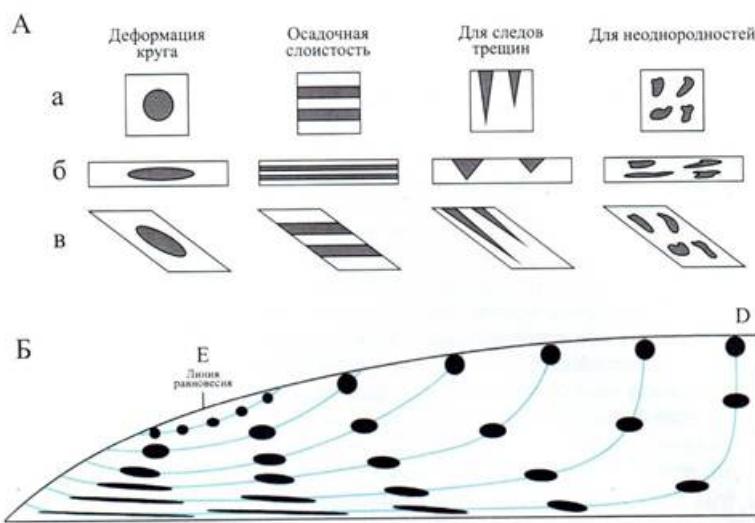


Рис. 2. А – изменение формы круга, прямоугольника и различных текстурных компонент льда под действием однородных деформаций: а – исходное состояние, б – после чистого сдвига, в – после простого сдвига [14]; Б – рисунок деформации в ледниковом куполе при его растекании (Е – граница питания, D – ледораздел) [30].

Ошибочное понимание А. П. Шумским физической причины движения глетчерного льда породило ошибки при интерпретации динамики ледника в процессе его движения и преодоления препятствий. В результате, многие феноменологические постулаты ледниковой теории XIX века получили научное обоснование со стороны «географической» гляциологии. Но начиная с середины XX века эта гляциология быстро становилась отраслью геофизики, в значительной степени благодаря существенному расширению сведений о физических свойствах глетчерного льда. Так, было экспериментально установлено, что в процессе движения упругая деформация льда уже при значении порядка 0,1% сменяется пластической (рис. 3). Например, понижение поверхности ледника мощностью 1000 м в процессе гравитационного растекания всего на 1 м является деформацией $\epsilon = 0,001$ (0,1%). Таким образом, при анализе движения ледника его упругостью можно пренебречь, что признал и П. А. Шумский [3, 19]. Этот факт имеет принципиальное значение. **Он дезавуирует использование Шумским уравнения деформации Пуассона для доказательства существования в леднике латеральной компоненты его гравитационного давления на ложе, так как упомянутое уравнение применяется только для упругой деформации.** Кроме того, важнейшим свойством упругости служит передача механических напряжений на расстояние, поэтому представления о существовании в толще движущегося ледника продольного напряжения, создающего напор на выступы ложа, противоречит физике глетчерного льда. Гравитационное давление ледника на свое ложе не является гидростатическим, как полагают некоторые гляциогеологи [1, и др.]. Чтобы отличить его от гидро- и литостатического, гляциологи называют это давление криостатическим.

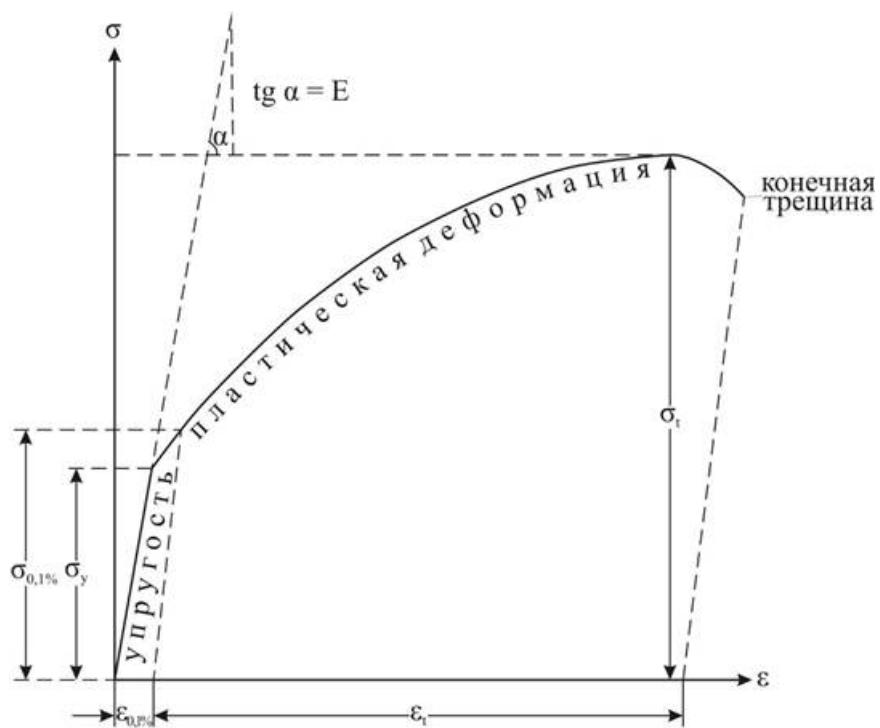


Рис. 3. Типичная кривая «напряжение-деформация» для поликристаллического льда [21]; σ_y – условный предел текучести; σ_t – напряжение, при котором в образце зарождается шейка растяжения; $\sigma_{0,1\%}$ – напряжение, необходимое для возникновения постоянной деформации $\varepsilon = 0,1\%$; ε_t – конечная пластическая деформация; E – модуль Юнга.

Сопротивление самопроизвольному течению глетчерного льда со стороны пород ложа приводит к тому, что, поверхность ледниковых щитов приобретает наклон по направлению движения. Это противоречит главному положению ледниковой теории, которое отчетливо сформулировал В. И. Астахов, принимая причину за следствие: «Необходимо твердо усвоить: сдвиговые напряжения на дне ледника и, следовательно, его движение по латерали обеспечивается наклоном поверхности льда, зависящем не от уклона скального ложа, а от баланса масс в леднике, то есть от климата. Чем круче наклонена поверхность ледника, тем сильнее боковое напряжение в его подошве. Это выражается формулой Ная» [1, с. 102]. На самом деле Дж. Най объяснял приведенную закономерность тем, что: «Количество осадков в центре движущегося большого ледникового щита лишь незначительно превышает потери от испарения и таяния. Такого превышения для поддержания движения недостаточно, иначе изменение h (мощность ледника Р. К.) могло бы определяться климатическими факторами» [31, с. 529]. Оценивая величину сопротивления ложа самопроизвольному движению ледников Дж. Най исходил из того известного факта, что современные ледники с латеральными размерами, существенно превышающими их мощность, находятся в состоянии квазистационарного равновесия. В таком состоянии для пластины льда мощностью h , находящейся на плоском ложе, наклоненном к горизонту под углом α , сила сопротивления ложа движению ледника при отсутствии донного скольжения уравновешивается компонентой ее веса, параллельной этому наклону: $\sigma = \rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha$ (формула Ная), но направленной в противоположную сторону (рис. 4). Из-за подобной уравновешенности они, казалось бы, должны быть неподвижными, однако, они движутся. Отсюда, следует, что для движущегося ледника первичным фактором, определяющим его деформационное поведение, служит движение, тогда как наклон поверхности льда к горизонту вторичен. Причиной является чрезвычайно низкое значение важного физического параметра –

периода релаксации напряжений материала. Он измеряется временем T_r , за которое напряжение при постоянной деформации уменьшается в e раз, где e – основание натуральных логарифмов. Глетчерный лед отличается крайне низким значением T_r , вследствие чего он начинает деформироваться практически с момента формирования. Релаксация напряжений происходит за счет медленной деформации находящегося под криостатическим давлением льда по периметру его свободной боковой поверхности. В отличие от земной коры, в которой тектонические напряжения продуцируются на глубине и, в конце концов, релаксируют на дневную поверхность, в ледниках движущая сила действует сверху вниз и возникающие в их подошве напряжения противодействия ламинарному течению льда могут релаксировать только на свободные стенки глетчера, путем деформирования (приведения в движение) слагающего их льда. **Таким образом, ламинарное растекание льда служит механизмом релаксации существующего в нем гравитационного напряжения.** Упомянутый механизм един для горных и равнинных ледников, их деление на ледники стока и растекания [19] не имеет физического смысла.

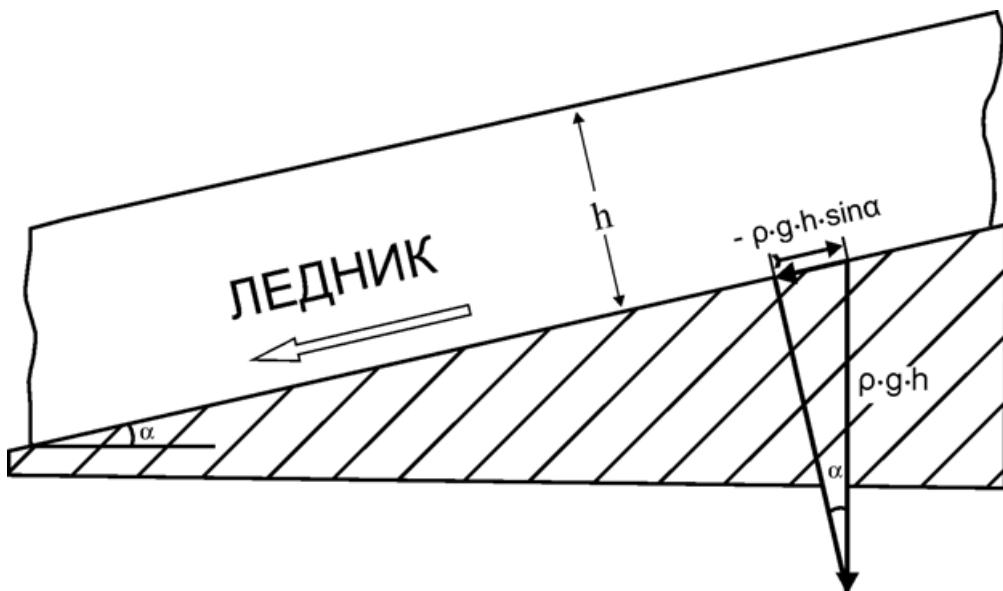


Рис. 4. Квазистационарное состояние пластины льда мощностью h , находящейся на плоском ложе, наклоненном под углом α . Несмотря на то, что наклонная компонента $\rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha$ уравновешена силой сопротивления пород ложа (минус $\rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha$), ледник течет вниз по склону, так как не выдерживает собственного веса.

Из всего изложенного следует, что продольное напряжение в подошве ледникового покрова, горизонтальные размеры которого существенно превышают мощность, не может «нормально передаваться, как в твердых телах», поскольку служит не причиной, а следствием (функцией) движения льда, возникшая из-за необходимости нейтрализации сопротивления этому движению. Другими словами, **продольный уклон поверхности необходим ледникам не для возникновения течения, а для преодоления сопротивления ему на границе с ложем.** В горных ледниках такая необходимость практически отсутствует, поскольку в процессе их роста они достигают мощности h , при которой компонента веса ледника, параллельная наклону его подошвы под углом α , компенсирована сопротивлением пород ложа (рис. 4). Дж. Най [31] показал, что наклон поверхности движущегося ледникового щита, значения h и α которого не изменяются существенно на расстояниях порядка h , с достаточной точностью определяется формулой $\rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha$ и в тех случаях, когда наклон его ложа варьирует по величине и (или) направлению. **Квазистационарное равновесие таких ледников было**

достигнуто за длительное время, на протяжении которого их мощность стала функцией сопротивления движению, а не климата.

2. Влияние физических свойств глетчерного льда на динамические условия его движения

Способность материалов к течению под влиянием напряжений, не превышающих их прочности (ползучесть), определяется коэффициентом динамической вязкости (η). Аморфные твердые тела подобно жидкостям обладают ньютоновской вязкостью, при которой деформация происходит с постоянной скоростью (установившаяся ползучесть): $\dot{\epsilon} = \eta \cdot \tau$, где τ – базальное сдвиговое напряжение, $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации. Глетчерный лед отличается характерной для кристаллических пород экспоненциальной зависимостью скорости деформации от базального напряжения (закон Глена):

$$\tau^n = \eta \cdot \dot{\epsilon} \text{ или } \dot{\epsilon} = \tau^n \cdot B \quad (1)$$

где B – параметр, обратный коэффициенту η , зависящий прежде всего от температуры льда. Величина показателя n в экспериментах изменялась от 1,9 до 4,5 при среднем значении 3 [29]. На стадии зарождения ледника он лишь ненамного превышает единицу и деформационное поведение льда близко к установленнойся ползучести. После того, как τ превысит предел этой квазиустановившейся ползучести τ_0 (рис. 5), показатель степени n начинает быстро расти и скорость деформации существенно возрастает. При обычно применяемом в расчетах значении $n = 3$ двукратное увеличение базального напряжения τ вызовет возрастание скорости деформации $\dot{\epsilon}$ в 8 раз. Однако, на начальной стадии для достижения напряжением величины τ_0 требуются годы [27]. Причина в том, что с момента зарождения лед находится в состоянии внутренней деформации (постоянная перестройка водородных связей с перекристаллизацией). Она вызвана ростом гравитационной нагрузки на ложе, представленной сверху вниз снегом, фирном и льдом. Когда гравитационное давление этого осадочно-метаморфического «пирога» на ложе достигает величины порядка 0,1 МПа (1бар) глетчерный лед в его основании начинает течь с заметной скоростью.

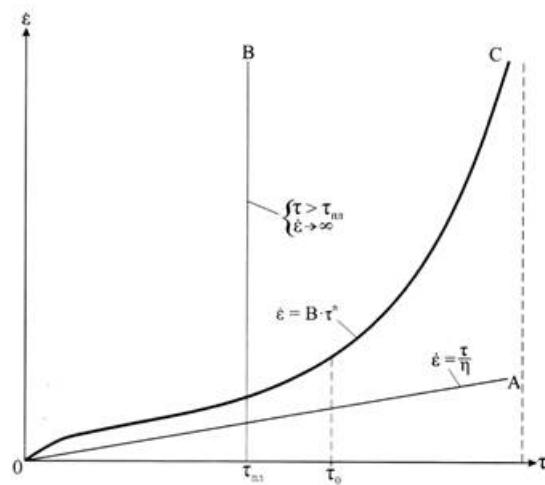


Рис. 5. Зависимость между сдвиговым напряжением τ и $\dot{\epsilon}$ (скоростью течения): А – для вязкой ньютоновской жидкости, В – для идеально пластического тела, С – для поликристаллического льда [4].

Напряжения (τ_0), при которых деформация ледника близкая к установленнойся ползучести сменяется течением с быстро возрастающей скоростью (рис.6),

незначительны по величине составляя 0,16 и 0,2 МПа при температурах, соответственно, минус 1,2 и 1,8° [23]. Напряжения сдвигов в основании современных движущихся ледников обычно не превышают эти значения. В горно-долинных ледниках Альп они изменяются от 0,05 до 0,15 МПа [31], в Антарктиде – от 0,03 до 0,1 МПа, в Гренландии – от 0 до 0,1 МПа, во многих других ледниках – от 0,01 до 0,12 МПа [2]. И, хотя вблизи ледопадов напряжение может достигать несколько больших величин, оно редко превышает 0,2 МПа [11, 24]. Относительно повышенные напряжения могут возникать и на проксимальных сторонах выступов ледникового ложа. В этом случае показатель степени n в уравнении Глена быстро увеличивается в 2-3 раза, течение льда продолжается со все возрастающей скоростью и ледник обтекает препятствие, что может сопровождаться образованием в нем трещин. Таким образом, ледник в силу своих реологических свойств неспособен оказывать неограниченное боковое давление на выступы ложа, препятствующие его течению, а в самом леднике не могут долго сохраняться напряжения, превышающие условный предел квазистабилизированной ползучести τ_0 (порядка 0,2 МПа). При таких напряжениях во фронтальной части ледника мощностью порядка 50 м он не смог бы деформироваться, например, юрские, палеогеновые и четвертичные глины широко известных Каневских «гляциодислокаций» на Днепре [6]. Сдвиговая прочность литифицированных пород (базальты, известняки, прочно скементированные песчаники и алевролиты и т. п.) на порядок величины выше, поэтому представители гляциологии как отрасли геофизики считают, что проблема преодоления ледником препятствий движению «заключается в объяснении... обтекания выступов ледникового ложа в предположении, что лед находится при температуре таяния под давлением» [14]. Между тем, популярный современный гляциогеолог рассуждает иначе: «Именно в тектонических эффектах наиболее наглядно проявляется фантастическая энергетика ледниковых процессов. При наличии обусловленных рельефом и литологией препятствий для свободного скольжения ледник стремится их стереть, образуя гляциодислокации и отторгая крупные блоки осадочных пород» [1]. Подобное утверждение противоречит не только теоретической гляциологии, но и З-му закону Ньютона: «Действию всегда есть равное и противоположное противодействие». Гравитационная энергия ледника затрачивается на движение, свободная энергия в нем отсутствует, вследствие чего в системе ледник – выступ ложа «действие» осуществляется не самопроизвольно движущимся ледником, а неподвижным препятствием его движению. В леднике, «упирающемся» в выступ пород ложа, согласно З-му закону Ньютона должно возникнуть напряжение, равное сдвиговой прочности пород этого препятствия, которая превышает прочность льда (~ 0,1 МПа) нередко на порядок величины. Для «стирания» выступа ложа потребуется еще более высокое напряжение. Все это противоречит физике ледника (рис. 5, 6), вследствие чего он не сминает и не срывает породы, экспонированные выступом ложа, а **деформируется под «действием» препятствия, то есть обтекает его.** Преодоление крупных препятствий обеспечивается механизмом, отраженным уравнением (1), мелких (порядка метра) – путем скольжения с протаиванием льда на проксимальной и его новым замерзанием на дистальной сторонах препятствия [32].

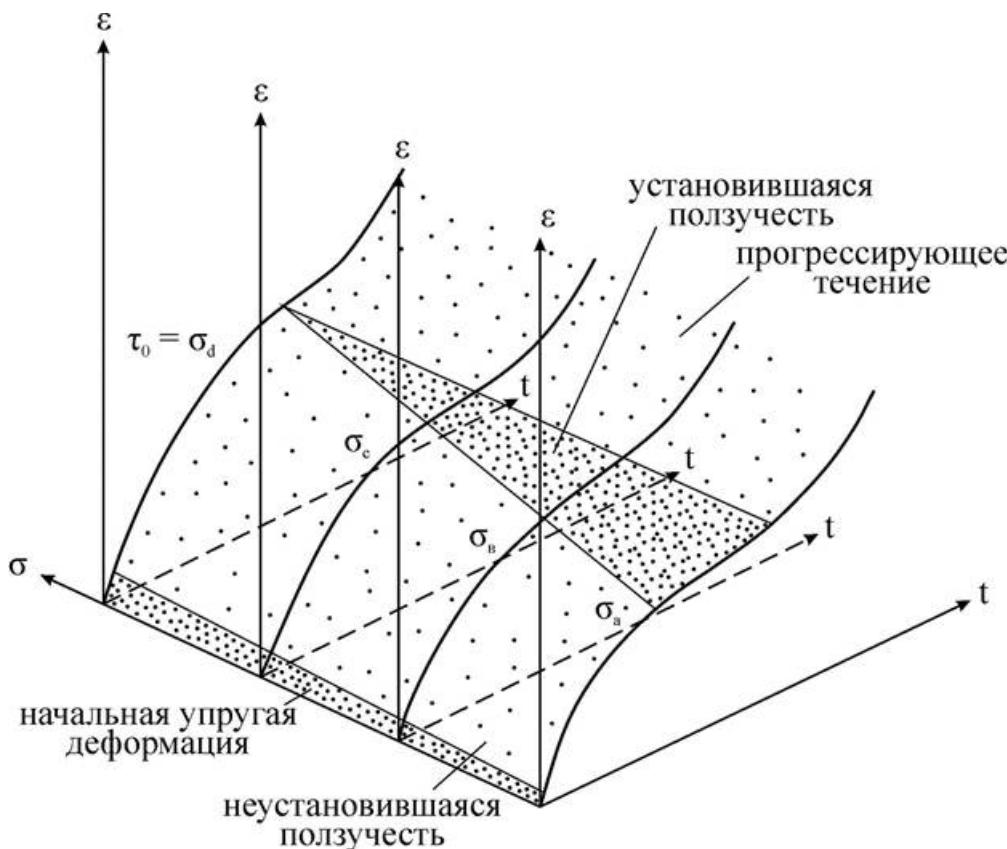


Рис. 6. Кривые кинетики деформации (ε) поликристаллического льда при постоянных напряжениях ($\sigma_a < \sigma_b < \sigma_c < \sigma_d$) при постоянной температуре [23]. t — время, $\tau_0 = \sigma_d$ — напряжение, при котором неустановившаяся ползучесть сменяется прогрессирующим течением, минуя стадию установившейся ползучести (верхний предел установившейся ползучести). Точками заполнены интервалы начальной упругой деформации и установившейся ползучести.

Установленные современной гляциологией физические законы движения глетчерного льда не совместимы и с постулатом геологической ледниковой теории, в соответствии с которым напряжения в ледниках максимальны у продольных окончаний, где и сосредоточены основные признаки их геологической деятельности. Понятие «напряжение» всегда относится к произвольной точке испытывающего его тела и имеет размерность в современной международной системе физических единиц — $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$. Если умножить единичное напряжение на единичный объем (м^3), получим $\text{кг}\cdot(\text{м}^2/\text{с}^2)$, то есть размерность энергии — $\text{м}\cdot\text{в}^2$. Следовательно, механическое напряжение представляет собой энергию, отнесенную к произвольной точке физического тела, находящегося под силовым воздействием. Энергия же в физике определяется как возможность совершать работу. В леднике источником энергии служит сила веса. Работа (движение) ледника обусловлена самопроизвольным переходом потенциальной (гравитационной) энергии в кинетическую, передача которой на расстояние, как известно, невозможна без потерь. Ледник в своей краевой зоне обладает незначительной энергией, так как основная ее часть израсходована на движение из области питания, чем обусловлено значительное увеличение латеральных размеров ледника при существенном снижении его мощности. На окраинах ледника, не разгружающегося в океан айсбергами, она, обычно, измеряется десятками метров. Исходя из вышесказанного способность глетчера выполнять механическую работу на своей окраине определяется мощностью льда на этой окраине, а отнюдь не разницей между ней и его мощностью в области питания (порядка 2-3 км), как утверждает

ледниковая теория XIX века.

Перемещение ледника относительно поверхности ложа невозможно без его скольжения по этой поверхности. В теоретической гляциологии роль базального скольжения служит объектом дискуссии [27]. В настоящее время общепризнано, что необходимым условием, без которого оно невозможно, является наличие в подошве ледника тончайшей пленки воды, резко снижающей трение скольжения. Отсюда следует, что ледник, подошва которого способна перемещаться относительно поверхности ложа, должен обладать мощностью, достаточной для того, чтобы базальный лед имел температуру таяния под криостатическим давлением [11, 14]. Последнее условие, как было показано ранее, требуется и для преодоления глетчером выступов ложа, препятствующих его движению. Оно было выполнено в процессе приобретения ледником состояния квазистационарного равновесия. При повышении давления на 1 бар температура плавления льда снижается на $0,00752^{\circ}$, поэтому в подошве умеренного ледника мощностью h лед должен таять при температуре минус $0,000726 \cdot h$ [19]. Простой подсчет показывает, что ледники с измеренными напряжением базального льда 0,16 и 0,2 МПа и температурой таяния под криостатическим давлением минус 1,2 и $1,8^{\circ}\text{C}$ (см. выше), имели мощность, равную, соответственно, $\sim 1,7$ и $\sim 2,5$ км, что по порядку величины соответствует представлениям о мощности четвертичных материковых оледенений.

Большую роль в решении проблемы скольжения ледника по ложу играют результаты эксперимента на одном из выводных ледников Исландии [25]. В 1-2 м над его подошвой была пройдена система туннелей и в нескольких точках в подстилающий тилл вставлены на глубину от 0,65 до 0,85 м стержни с надетыми на них соприкасающимися кольцами. Стержни выдергивались и кольца оставались на месте в форме вертикальных полых колонн. Через 10 дней в шурфах, выкопанных в районе каждого стержня, зарисовывалось новое положение колец. Оно зафиксировало деформацию простого сдвига (скашивание прямого угла) в вертикальной плоскости, охватывающей верхние 0,6 м подледникового тилла. За 10 дней горизонтальная амплитуда сдвига достигла 0,5 м, причем основную ее часть составила пластическая деформация и только 10% пришлось на смещение подошвы ледника относительно кровли тилла, то есть на скольжение (рис.7). **Таким образом, движению ледников препятствует не только трение на разделе ледник/ложе, но и адгезия – молекулярное притяжение между соприкасающимися поверхностями, одна из которых перемещается.** Рассматриваемый феномен служит причиной того, что наблюдения за скольжением ледников, не учитывающие латерального перемещения (волочения) кровли пород ложа, сильно завышают амплитуду скольжения ледника. Вероятно, это послужило одной из причин ошибочного мнения П.А. Шумского о глыбовом скольжении как о преобладающей форме движения ледников.

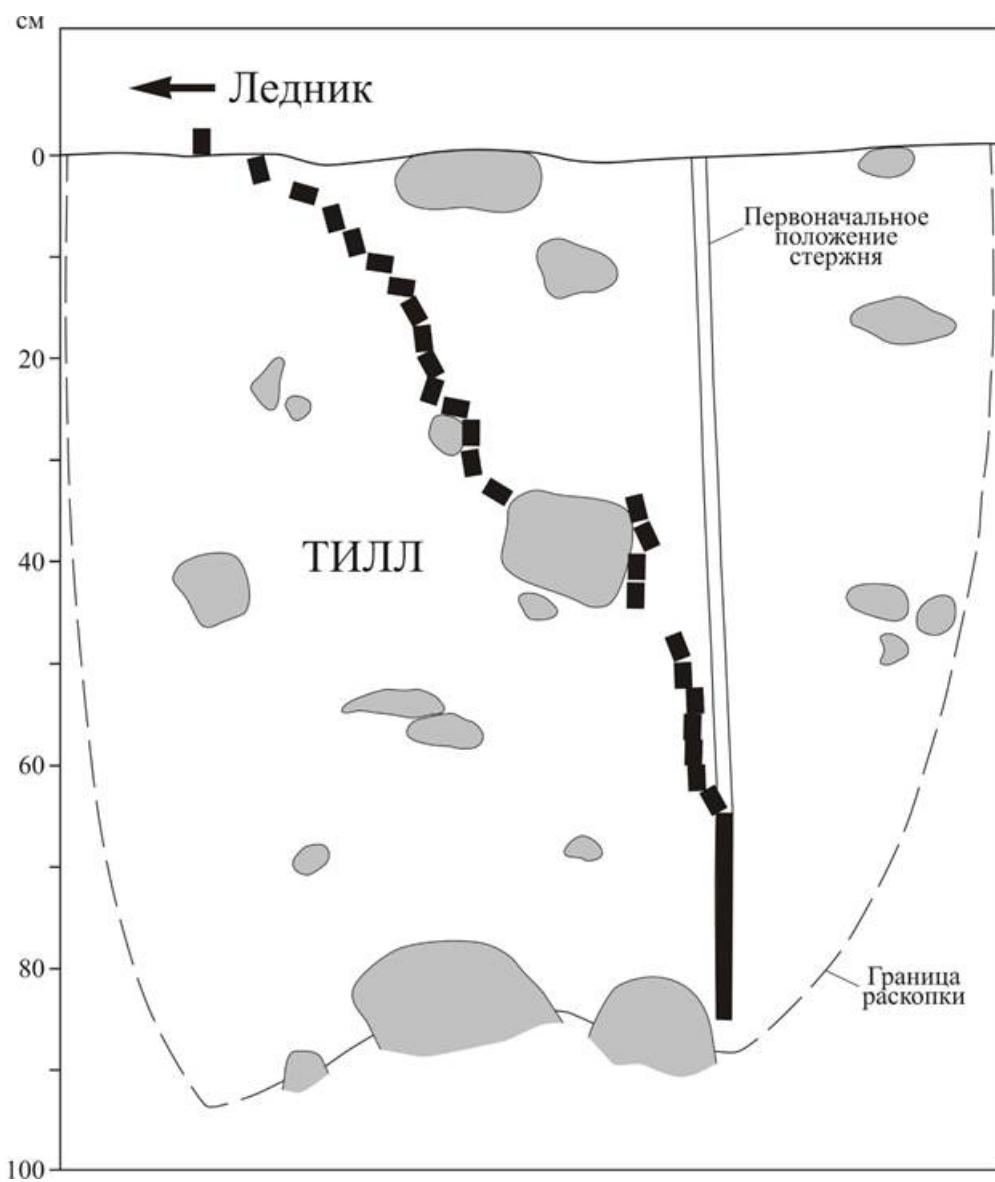


Рис. 7. Результаты эксперимента Дж. Болтона на одном из ледников Исландии [25].

Положение индивидуальных колец в подледниковом тилле через 24 часа после извлечения вертикального стержня, на который они были надеты. 90% амплитуды движения ледниковой подошвы вперед сопровождалось деформацией подстилающего тилла, заключающейся в пластическом простом сдвиге в вертикальной плоскости.

Производным глыбового скольжения глетчерного льда по породам ложа считается его смещение по плоскостям внутренних надвигов. В. И. Астахов утверждает, что внутриледниковые надвиги наиболее распространены в краевой зоне ледников и «кинематически не отличаются от надвигания пластины горных пород в условиях альпийского тектогенеза» [1, с. 104]. Однако в леднике возникновение надвигов теоретически невозможно. В соответствии с известным принципом Андерсона [16] надвиги образуются под углом скальвания ($30\text{--}35^\circ$) к горизонтальной оси наибольшего сжатия и, следовательно, в прямоугольной системе координат с вертикальной осью з тензор векторов главных нормальных напряжений при формировании надвигов должен иметь вид: $\sigma_x > \sigma_y \geq \sigma_z$. Между тем, поскольку движение ледника осуществляется за счет расхода гравитационной энергии, для него тензор главных нормальных напряжений имеет вид: $\sigma_z > \sigma_x \geq \sigma_y$, то есть ось наибольшего сжатия ориентирована вертикально, что исключает возможность возникновения сколов надвигового типа (рис. 8).

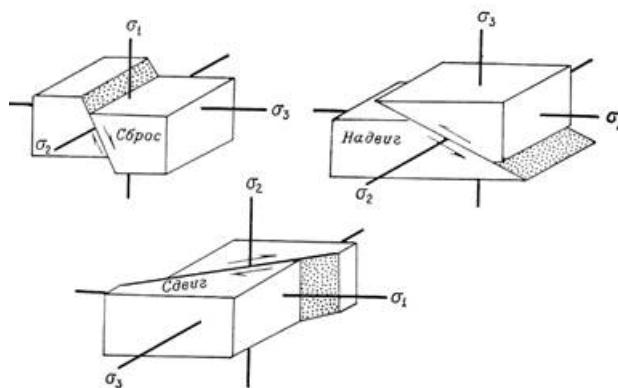


Рис. 8. Образование сбросов, надвигов и сдвигов на поверхности Земли, σ_1 , σ_2 и σ_3 – векторы максимального, промежуточного по величине и минимального главных нормальных составляющих тензора напряжений [16].

Прочность льда на отрыв, как и у большинства других материалов, меньше прочности на сдвиг. Учитывая это, а также кинематику движения глетчерного льда главным кинематическим типом возникающих в нем разрывных нарушений, У. С. В. Патерсон считал трещины отрыва и раздвинги. В краевых частях ледника, где его мощность минимальна, они могут развиваться не только от поверхности, но и от подошвы ледника, если хоть одна компонента тензора напряжений является растяжением [14]. П. Дж. Хадлстон в обзоре структур и текстур глетчерного льда [30] приводит сведения об экспериментах, доказывающих, что даже в серджеирующих ледниках, где наблюдались наиболее высокие напряжения, динамические условия для образования надвигов неблагоприятны. Он отмечает, что в публикациях с примерами надвигов или сдвигов выводы о динамических условиях их образования базируются на косвенных признаках. При этом, Хадлстон ссылается на работы, в которых структуры с отчетливыми смещениями формально надвигового типа интерпретируются как трассы сомкнутых раздвингов, испытавших вращение в процессе деформации простого сдвига. Кинематически они реактивизированы как надвиги, хотя по динамическим условиям таковыми не являются. Примером подобных заблуждений служит фотография разрывного нарушения в базальной части одного из выводных ледников Гренландии, выполненная Ю. А. Лаврушиным (рис. 9). В интерпретации автора она иллюстрирует внедрение морских голоценовых отложений ложа ледника в растущую от его подошвы надвиговую чешую. На снимке видно, что это не надвиговая чешуя, а трещина отрыва, испытавшая деформацию простого сдвига в вертикальной плоскости: ее первоначально вертикальное положение, характерное для трещин отрыва, на небольшом расстоянии от подошвы ледника сменилось наклоном, как у надвига. Однако, и в наклонном положении стенки трещины осталась разомкнутыми, что несовместимо с динамической обстановкой формирования надвигов (рис. 8, 9).

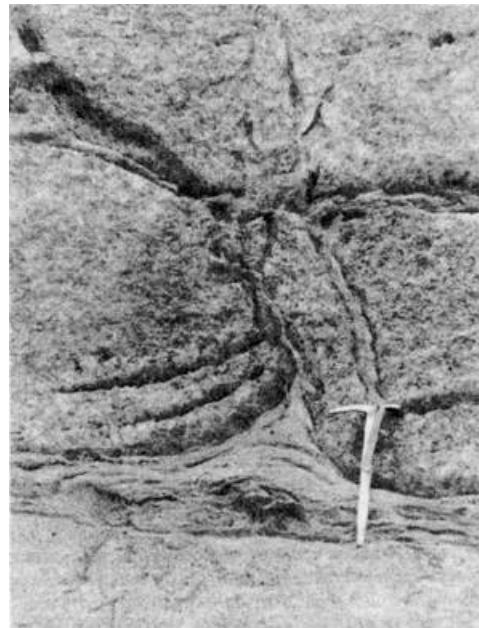


Рис. 9. «Гляциодиапир» в основании «надвиговых чешуй» выводного ледника Фредериксхоб-Исблунк, Гренландия [\[12\]](#). Пояснения см. в тексте.

Ярким примером деформированности глетчерного льда в обстановке латерального сжатия с возникновением надвигов В. И. Астахов [\[1\]](#) и Д. Дрюри [\[2\]](#) считают приведенное в статье Болтона [\[22\]](#) изображение разреза «чешуйчато-надвиговой» структуры краевой части одного из выводных ледников Западного Шпицбергена. Он движется по дислоцированным скальным породам докембрийской формации Гекла Хук, которые по разлому северо-западного простирания контактируют с палеогеновыми отложениями в узкой небольшой бухте, которая далее называется Безымянной. Болтон обследовал разрез ледяного клифа юго-восточного берега бухты (рис 10). Благодаря наличию горизонтов с многочисленными газовыми пузырями, слоев, образованных кристаллами льда разных размеров, или чередованию чистых лент с лентами, загрязненными моренным материалом, ледник здесь обладает субгоризонтальной полосчатостью. Она интенсивно дислоцирована и пересечена многочисленными нарушениями, ориентированными примерно поперек направлению движения ледника. Полосчатость обрисовывает группы мелких складок с осевыми поверхностями, наклоненными навстречу направлению движения ледника, причем с висячим боком разрывов сопряжены антиклинали, а с лежачим – синклинали, что характерно для латерального сжатия (рис. 11). По этой причине Болтон назвал разрывные нарушения надвигами, хотя они имеют несвойственную надвигам форму смесятелей, которые в обрывах высотой до 30 м обладают крутым, до субвертикального, наклоном. Лишь у подножья они несколько выполаживаются иногда до значений, характерных для угла скальвания при образовании надвигов ($30\text{--}35^\circ$).

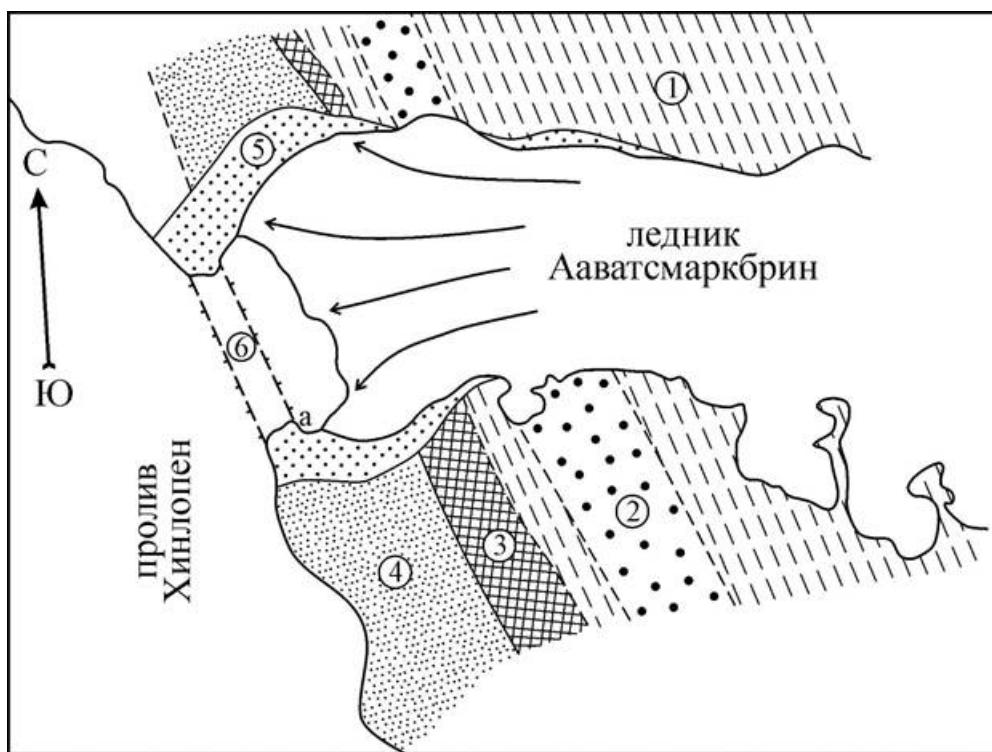


Рис.10. Генерализованная геологическая карта района нижнего течения ледника Ааватсмарктрин остров Западный Шпицберген [22]. Формация Гекла Хок: 1 – сланцы, 2 – кварциты, 3 – известняки. Палеогеновые отложения: 4 – песчаники. Голоценовые отложения: 5 – морена; а – расположение ледяного обнажения, разрез которого приведен на рис. 11; б – подводный порог (предположение Р.К.).

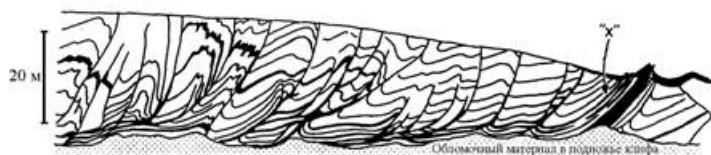


Рис. 11. Разрез вдоль южного фланга ледника Ааватсмарктрин в бухте Безымянной (а – на рис. 10 по [22]). Загрязненный моренным дегритом лед залегает параллельно полосчатости чистого льда («Х») и иногда затянут в срезающие эту полосчатость разрывные нарушения. Вблизи продольного окончания ледника экспонирована экзотическая пластина мерзлых четвертичных отложений.

На юго-западной окраине ледникового клифа в глетчерный лед включена пластина мерзлых четвертичных отложений, содержащих только поровый лед, которая выступает из-под осыпи в основании обрыва под углом 50° навстречу направлению движения ледника. Вблизи поверхности последнего наклон быстро возрастает до 85°. Ее разрез начинается горизонтом слоистого крупнозернистого песка максимальной мощностью 0,8 м с большим количеством целых морских раковин и их обломков. По лаконичному описанию Дж. Болтона неясно, присутствует ли он в основании всей экзотической пластины или встречается обрывками. Очевидно лишь, что пластина сложена, в основном, черным диамиктоном, который на Баренцевом шельфе имеет алевритоглинистый состав с подчиненным количеством песка и незначительным содержанием грубообломочного материала [8, 10]. Диамиктон сменяет пески «через контакт переслаивания» и содержит раковины морских моллюсков, причем некоторые, даже наиболее тонкие, сохранились целиком. Болтон считал его тиллом, отложенным в море путем таяния айсбергов или фронтальной части ледника, однако, скорее всего этот

«тилл» является мерзлым диамиктоновым илом. Осадки, по зерновому составу и текстуре идентичные консолидированному диамиктону (диамиктоновые илы) являются характерной фацией морского голоцене и конца позднего неоплейстоцена Баренцевского шельфа, в том числе, фиордов Шпицбергена [9, 10, 28]. Интерпретации Дж. Болтона помимо крутого наклона «надвигов» противоречит тот факт, что висячий борт аллохтонной пластины отчетливо параллелен двум контактирующим с ним линиям разрывных нарушений, внешняя из которых срезает полосчатость льда (рис. 11). Продвижение ледника Ааватсмаркбрин к морю с вторжением его в безымянную бухту акватории пролива Хинлопен, вероятно, происходило на протяжении так называемого малого ледникового периода, когда в горных районах Европы в XVII-XIX веков наблюдалось увеличение мощности и, в связи с этим, всеобщее наступление ледников. На Шпицбергене оно получило название стадии Трекслен.

Несмотря на отсутствие инструментальных измерений элементов залегания слоев и сместителей разрывов имеющиеся данные позволяют выдвинуть гипотезу, объясняющую причину, по которой пластина консолидированных четвертичных отложений была эвакуирована с морского дна, включена в глетчерный лед и поставлена «на голову». Наиболее вероятен следующий ответ на эти вопросы: упомянутая пластина образована нагнетанием четвертичных отложений ледникового ложа в зияющую трещину отрыва (раздвиг), то есть имеет такое же происхождение, как и ее миниатюрный аналог, наблюдавшийся Ю. А. Лаврушиным на побережье Гренландии (рис. 9). Ледник Ааватсмаркбрин после выхода из ущелья на дно бухты Безымянной стал растекаться в разные стороны, вследствие чего его мощность существенно уменьшилась, и он приобрел способность к образованию трещин отрыва и раздвигов, растущих от подошвы ледника вверх. В один из таких раздвигов шириной в метры произошло гравитационное нагнетание гидропластичного диамиктонового ила, прорвавшего тонкий покров песка, обрывки которого, вероятно, сохранились локально. Выдавливание диамиктонового ила продолжалось и после того, как его дайка достигла поверхности ледника, на которой из-за этого образовался покров подобный диапировой шляпе (рис. 11). В дальнейшем исходное вертикальное положение минеральной дайки было нарушено деформацией простого сдвига в вертикальной плоскости, сопровождавшей движение глетчера по дну и особенно активной в его подошве. Вследствие этого растущие снизу трещины отрыва и вместе с ними экзотическая внутриледниковая минеральная дайка приобрели наклон навстречу направлению движения ледника. В процессе внутриледниковой деформации простого сдвига стенки трещин отрывов смыкались. Современный облик отрезок побережья бухты Безымянной, наблюдавшийся Дж. Болтоном, приобрел в результате недавнего, вероятно позднетрексленского, поднятия площади, вследствие которого подошва ледника Ааватсмаркбрин на его юго-восточном фланге местами вышла из-под уровня моря. Это сопровождалось промораживанием материала минеральной дайки, ранее располагавшейся ниже уровня моря.

Резюмируя все вышеизложенное, можно утверждать, что движение (ламинарное течение) ледников осуществляется путем межзернового скольжения с адгезией (воловением) кровли пород ложа и с периодическим проскальзыванием относительно нее. Необходимость преодолеть сопротивление пород ложа этому движению привела к тому, что умеренные по температуре ледники, при условии, что их горизонтальные размеры многократно превышают мощность, достигли состояния квазистационарного равновесия, а их базальная часть приобрела температуру таяния под давлением. В сочетании с реологическими свойствами льда это послужило причиной того, что, несмотря на отсутствие в леднике горизонтальной компоненты гравитационного давления, он может преодолевать сопротивление движению со стороны пород ложа без

каких-либо проявлений так называемой гляциотектоники. Отсюда следует, что вошедшие в обиход представления о горизонтальном ледниковом напоре, гляциодислокациях четвертичных и подстилающих отложений, срыве выступов поверхности ледникового ложа с образованием крупных и гигантских ледниковых отторженцев и т. п. в корне противоречат базовым положениям современной гляциологии и механики.

С некоторыми ограничениями это относится и к ледниковой эрозии, являющейся в гляциологии объектом дискуссии, отраженной в публикациях Дж. Болтона и Б. Халлете (см. [9]). По мнению Болтона, глубинная эрозия определяется криостатическим давлением ледника на заключенный в его подошве минеральный обломок, вследствие чего генерируются очень большие контактные давления обломка на ледниковое ложе. Его оппонент считает, что упомянутое давление не зависит от мощности ледника, поскольку шероховатости обломков пород, абрадирующих ложе, полностью окружены льдом или пленкой воды, находящимися под криостатическим давлением. По этой причине ледник ведет себя как вязкая жидкость, которая придает заключенным внутри него породным обломкам плавучесть, пропорциональную отношению плотностей породы и льда. Д. Дрюри [27] отмечает, что подобное заключение ранее высказывалось и многими другими исследователями. Между тем, ледниковая эрозия принципиально отличается от водной, что накладывает на нее существенные ограничения. Течение воды со свободной верхней поверхностью возможно только при наличии гидравлического уклона, обусловленного топографическим наклоном местности. Работа реки заключается в уменьшении этого уклона, а ее течение направлено к местному или главному базису эрозии. Если местность тектонически стабильна, река может размыть залегающие с поверхности породы только до уровня, не превышающего глубину плесов в ее русле. Глубокое врезание речных долин в породы субстрата в десятки и сотни раз превышающее глубины речных плесов, происходит там, где водная эрозия действует на фоне длительного тектонического поднятия местности. В отличие от гидравлического уклона реки, наклон поверхности ледника является не причиной, а следствием его движения и создается в процессе последнего. Механическая энергия ледникового щита, расположенного на горизонтальном основании, затрачивается на возникновение наклона его поверхности, делающего возможным латеральное гравитационное расположение льда и преодоление препятствующих ему неровностей рельефа. **Эрозионная работа умеренного по температуре ледника, поэтому, ограничивается стлаживанием, полировкой и изборождением выступов пород ложа.** Базальная часть холодных ледников примерзла к этим породам и, поэтому, практически не производит геологической работы. Таким образом, распространенные представления о способности ледников и ледниковых щитов к крупномасштабной эрозионной работе, как минимум, дискуссионны и, скорее всего, ошибочны [9].

Заключение

Ледниковая теория, единственная из выдвинутых в начале XIX века глобальных геологических идей, сохранившаяся до нашего времени [15], основана на ошибочном понимании причины и, вследствие этого, физического механизма движения глетчерного льда. Подобный казус исторически обусловлен тем, что потребности практического применения геологической науки опережали развитие гляциологии, которая в период зарождения ледниковой теории (первая четверть XIX века) находилась еще в младенческом состоянии и до середины XX века была описательной наукой географического профиля [7]. Основоположники ледниковой теории, учитывая молодость рассматриваемого ими отрезка геологического времени, базировались (по умолчанию)

на представлениях о тектонической незыблемости земной коры (признавались лишь ее гляциоизостатические движения) и на платформенных равнинах северных и умеренных широт анализировали только экзогенные факторы формирования рельефа, осадков, а также их деформационной структуры. В настоящее время все факты, которые в последней четверти XIX века, были необъяснимыми с позиций водного или ледово-водного седиментогенеза, находят естественное объяснение в осадках высокосиротных шельфов [8,9], а приповерхностные дислокации четвертичных и дочетвертичных пород – в проявлениях неотектоники [9, 10, 16]. Неотектоническое происхождение установлено даже для отполированных и изборожденных поверхностей скальных пород, которые в соответствии с предыдущим изложением служат единственным материальным признаком геологической работы ледников. В пределах площади постулируемого Скандинавского центра оледенения, где эти признаки широко распространены фотографии В.Г. Чувардинского отчетливо демонстрируют тот факт, что подобные поверхности, экспонированные в береговых обрывах, ничем не перекрыты лишь в прибрежной зоне и вглубь суши скрываются под породы аллохтонного блока [18].

Если бы в то время, когда формировалась ледниковая теория, уже существовали представления о новейшей тектонике и тектонофизике, а также были известны результаты геолого-геофизических исследований в океанах и на высокосиротных шельфах, эта теория не смогла бы получить право на существование. Однако для современных российских и зарубежных научных сообществ ледниковая теория благодаря незнакомству с базовыми положениями современной гляциологии или инерции мышления по-прежнему служит основой парадигмы четвертичного периода. Современные публикации против этой парадигмы даже в виде объемных монографий (например, [9, 18] просто замалчиваются. Между тем, в отличие от западных стран, в России всегда, даже после торжества ледниковой теории, находились ее оппоненты. В 50-е – 60-е годы прошлого века в Советском Союзе даже происходила оживленная дискуссия между «гляциалистами» и «маринистами». Причиной послужила активизация картировочных, геологоразведочных и инженерно-геологических работ в Тимано-Печорской провинции и на севере Западной Сибири, обусловленная поисками углеводородного сырья и проектом переброски стока северных рек на юг [9, 10]. Но и те, и другие доказательства в свою пользу черпали из интерпретации результатов геолого-геоморфологических наблюдений. Предлагаемая статья рассматривает проблему на основе анализа физики глетчерного льда и ее влияния на энергетические возможности ледников воздействовать на породы ложа.

Наконец, актуальность статьи заключается и в том, что некоторые постулаты ледниковой теории вытекают из идеи самого существования ледниковых щитов на огромных площадях суши и эпиконтинентальных шельфов там, где их в настоящее время нет. В первую очередь это – гипотезы гляциоэвстазии и гляциоизостазии. Ведь последняя планетарная морская трансгрессия, во всяком случае, в конце неоплейстоцена-голоцене действительно существовала, а подошва современных Гренландского и Антарктического ледников на самом деле изостатически прогнута. Отсутствие гляциоизостазии в пределах постулируемых Скандинавского и Баренцевоморского центров оледенения обосновано в [9, 18], неледниковое происхождение гляциоэвстазии установлено в [9], но истинная природа планетарных трансгрессий моря требует выяснения.

Библиография

1. Астахов В.И. Четвертичная геология суши. СПб.: Санкт-Петербургский гос. университет. Институт наук о Земле, 2020. EDN: DZWZGZ.

2. Бадд У.Ф. Движение масс льда. М.: Гидрометеоиздат, 1975.
3. Войтковский К.Ф. Механические свойства льда. М.: МГУ, 1960.
4. Калесник С.В. Очерки гляциологии. Москва: Географиз, 1963.
5. Каплянская Ф.А., Тарнорадский В.Д. Гляциальная геология. Методическое пособие по изучению ледниковых образований при геологической съемке крупного масштаба. СПб.: Недра, 1993.
6. Костяной М.Г. Инженерно-геологические особенности глинистых пород района Каневских дислокаций. Киев: АН УССР, 1963.
7. Котляков В.М. Мы живем в ледниковый период? Ленинград: Гидрометиздат, 1966. 235 с.
8. Крапивнер Р.Б. Происхождение диамиктонов Баренцевоморского шельфа // Литология и полезные ископаемые. 2009. № 2. С. 133-148. EDN: KZYKKP.
9. Крапивнер Р.Б. Кризис ледниковой теории: аргументы и факты. М.: Геос, 2018. 319 с. EDN: YCEPPX.
10. Крапивнер Р.Б. Бескорневые неотектонические структуры. М.: Недра, 1986. 204 с.
11. Красс М.С. Математическая теория гидромеханики // Итоги науки и техники. Серия Гляциология. Т. 3. М.: ВИНИТИ, 1983.
12. Лаврушин Ю.А. Строение и формирование основных морен материковых оледенений. М.: Наука, 1976. EDN: RQLRKY.
13. Левков Э.А. Гляциотектоника. Минск: Наука и техника, 1980.
14. Патерсон У.С.Б. Физика ледников. Издание 2-е. М.: Мир, 1972.
15. Рябухин А.Г., Короновский Н.В. Концепция катастрофизма в геологии // Вестник МГУ. 1998. Сер. 4. Геология. № 6. С. 6-15.
16. Ферхуген Дж., Тернер Ф., Вейс Л. и др. Земля. Введение в общую геологию. Гл. 2. Минералы. Гл. 8. Деформация горных пород. М.: Мир, 1974.
17. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов (общая и прикладная). М.: Высшая школа, 1973.
18. Чувардинский В.Г. Четвертичный период. Новая геологическая концепция. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2012. 179 с.
19. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: АН СССР, 1955.
20. Шумский П.А. К теории движения и колебания ледников // Материалы гляциологических исследований. 1962. № 6. С. 31-41.
21. Ashby M.F., Jones D.R.H. Engineering materials – an introduction to their properties and application. Oxford: Pergamon Press, 1980.
22. Boulton G.S. On the origin and transport of englacial debris in Svalbard Glaciers // Journal of Glaciology. 1970. V. 9. № 56. P. 213-229.
23. Boulton G.S. Processes and pattern of glacial erosion // Coates D.R. (ed.) Glacial geomorphology, Binghamton, NY: State University of New York, 1974. P. 41-87.
24. Boulton G.S. Processes and pattern of subglacial sedimentation: a theoretical approach // Ice Age: Ancient and Modern Geol. J. Spec. Issue № 6. Liverpool, 1975. P. 7-42.
25. Boulton G.S. Processes of glacier erosion substrata // J. of Glaciol. 1979. V. 23. № 89. P. 29-48.
26. Dansgaard W., Jhonsen S.J., Clausen H.B. Evidence for general instability of past climate from 250-kyr ice core record // Nature. 1993. V. 364. P. 218-220.
27. Drewry D. Glacial Geologic Processes. Scott Polar Inst. Univers. of Cambridge, 1986.
28. Elverhøi A., Svendsen J.I., Solheim F. et al. Late Quaternary Sediment Yield from the Arctic Svalbard Area // The Journal of Geology. 1995. V. 103. P. 1-17.
29. Glen J.B. The creep of polycrystalline ice // Proc. Roy. Soc. (London) Ser. A. 228, 1955. P. 519-538.
30. Hudleston P.J. Structures and Fabrics in Glacial Ice; A Review // Journal of Structural

- Geology. 2015. № 81. Р. 1-27. DOI: 10.1016/j.jsg.2015.09.003. EDN: VENLEB.
31. Nye J.F. A method of calculating the thicknesses of the ice-sheets // Nature. 1952. V. 169. № 4300. Р. 529-530.
32. Weertman J. On the sliding of glaciers // Journal of Glaciology. 1957. V. 3. Р. 33-38.

Результаты процедуры рецензирования статьи

Рецензия выполнена специалистами [Национального Института Научного Рецензирования](#) по заказу ООО "НБ-Медиа".

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом статьи является изучение вопроса несовместимости теории четвертичных материковых оледенений с гляциологией как «отраслью геофизики».

Актуальность исследования автором статьи не представлена во введении, там дается только обоснование выбранного названия исследования. Автору, все-таки необходимо более четко охарактеризовать актуальность и значимость изучения данного вопроса.

Безусловно, понимание научным сообществом принципиальных отличий теории четвертичных материковых оледенений и современной гляциологии, как отрасли геофизики, позволит наиболее полно изучать и устанавливать закономерности геологической деятельности ледников.

Однако считаем, что во введении статьи выражение автора «....обособилась когорта специалистов....» лучше заменить на «.....обособленно сформировалась группа ученых....».

Целью исследования является выявление основных аспектов несовместимости теории четвертичных материковых оледенений и современной гляциологии, как отрасли геофизики.

Методология исследования основана на применении метода доказательных характеристик ошибочности теории четвертичных материковых оледенений. Используется метод формализации и доказательных расчетов.

Научная новизна исследований заключается в формулировании новых умозаключений, касающихся современной гляциологии, как отрасли геофизики. Так автор утверждает, что «ошибочное понимание А.П. Шумским физической причины движения глетчерного льда породило ошибки при интерпретации динамики ледника в процессе его движения и преодоления препятствий. В результате, многие феноменологические постулаты ледниковой теории XIX века получили научное обоснование со стороны «географической» гляциологии. Но начиная с середины XX века эта гляциология быстро становилась отраслью геофизики, в значительной степени благодаря существенному расширению сведений о физических свойствах глетчерного льда. Так, было экспериментально установлено, что в процессе движения упругая деформация льда уже при значении порядка 0,1% сменяется пластической».

Стиль статьи – научно-доказательный. Структура статьи не совсем соответствует требованиям журнала «Арктика и Антарктика», что требует ее корректировки. Доказательность утверждений автора основана на цитировании научных источников.

Автор отмечает, что установленные современной гляциологией физические законы движения глетчерного льда не совместимы с постулатом геологической ледниковой теории, в соответствии с которым напряжения в ледниках максимальны у продольных окончаний, где и сосредоточены основные признаки их геологической деятельности. Перемещение ледника относительно поверхности ложа невозможно без его скольжения по этой поверхности. В теоретической гляциологии роль базального скольжения служит

объектом дискуссии. В настоящее время общепризнано, что необходимым условием, без которого оно невозможно, является наличие в подошве ледника тончайшей пленки воды, резко снижающей трение скольжения. Отсюда следует, что ледник, подошва которого способна перемещаться относительно поверхности ложа, должен обладать мощностью, достаточной для того, чтобы базальный лед имел температуру таяния под криостатическим давлением.

Объем статьи соответствует требованиям журнала «Арктика и Антарктика». Библиография статьи включает в себя 31 литературный источник, 12 из которых – на иностранных языках.

Выводы в статье достаточно обоснованы, однако имеются очень резкие выражения: «ледниковая теория, единственная из выдвинутых в начале XIX века является заблуждением...» и «...в интересах науки нужно исключить из комплекса методов изучения геологии четвертичной системы отживвшую свой век ошибочную теорию».

Считаем, что новейшие достижения науки должны способствовать ее дальнейшему развитию и изучению актуальных вопросов отрасли. А теории, существовавшие ранее, являются историей науки и отмене не подлежат. Дальнейшее изучение закономерностей современной гляциологии несомненно имеет теоретическую и практическую значимость для отрасли геофизики.

Автору также необходимо более четко выделить практическую значимость полученных результатов исследования. Рецензируемая статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения замечаний.