

Подземные льды и наледи

УДК 551.345.2+551.324.05

doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-527-542

Оледенение Сибири и проблема пластовых залежей подземного льда

© 2017 г. В.С. Шейнкман

Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия;
Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия; Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
vlad.sheinkman@mail.ru

Glaciation of Siberia and the problem of massive ice beddings

V.S. Sheinkman

Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Research Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia;
Tyumen State University, Tyumen, Russia; Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
vlad.sheinkman@mail.ru

Received March 27, 2017

Accepted June 26, 2017

Keywords: *glaciation, ground ice, massive ice bedding, permafrost, Pleistocene.*

Summary

As a result of many years of the author's studies of glaciers and ground ices, a great amount of factual material has been collected for a purpose to analyze a possibility of burying the glaciers in the permafrost zone and to estimate a time of their stay in such a condition. According to the author's opinion, the Siberian glaciers were mainly the valley ones; ice sheets were never formed, and any existence of buried glaciers could not be real in the geological time scale. However, some researchers still believe that in the Quaternary ice sheets occurred in the North of Siberia, and, in addition, they consider the local massive ice beddings as relics of these sheets. No clear explanation of the similar origin of such ice structures exists at the present time, so development and variety of this ice could be easier explained by the permafrost genesis. Basing on results of observations carried out in all glacier regions of Siberia, the author concludes that glaciers cannot exist in the form of buried ice for a long time. This is unrealistic even in the North-East of Siberia, where the absolute minimum temperature is -67.8°C , and the mean annual air temperature drops below -17°C . The characteristic feature of the Siberia continental climate is short, but hot summer. In such a situation, the coarse fragmental morainic material, covering glaciers by the layer up to 3 m thick, cannot preserve the underlying ice from melting because the heat penetrates down with the air, liquid precipitation, and the melt water. When glaciers reduce, the dead ice, buried under a moraine, may be preserved in the coldest areas of Siberia for only 100–150 years. Therefore, despite the resemblance of the scarps of the ice bodies having the permafrost or glacial origin, consideration of them as relics of ancient glaciers would be wrong.

Citation: Sheinkman V.S. Glaciation of Siberia and the problem of massive ice beddings. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017. 57 (4): 527–542. [In Russian].
doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-527-542

Поступила 27 марта 2017 г.

Принята к печати 26 июня 2017 г.

Ключевые слова: *мёрзлые толщи, оледенение, пластовые залежи льда, плейстоцен, подземные льды.*

В ходе многолетнего исследования ледников и подземных льдов в Сибири автором собран обширный фактический материал, на основе которого исследуется возможность погребения ледников в области развития многолетней мерзлоты и даётся оценка длительности их пребывания в таком состоянии. Сделан вывод, что в масштабе геологического времени существование погребённых ледников в Сибири нереально, а спорные, иногда относимые к реликтам древних ледников пластовые залежи подземного льда на севере Сибири имеют неледниковое происхождение.

От редакции. Публикуемая статья В.С. Шейнкмана вызвала неоднозначную реакцию у рецензентов. Редакция получила рецензии с разными заключениями по поводу публикации статьи. После подробного обсуждения было принято решение опубликовать эту статью в дискуссионном порядке.

Введение

Одна из сторон создания полноценной картины развития природных льдов и предмет острого спора — вопрос о генезисе пластовых залежей под-

земного льда, прежде всего, о правомерности отнесения некоторых залежей ко льду погребённых ледников. Например, Е.Г. Карпов долгое время считал известную залежь льда «Ледяная гора» на Енисее результатом инъекций подземных вод, однако затем

он перешёл на позицию сторонников ледникового генезиса, изложив этот взгляд в монографии [1]. Однако в его монографии в соавторстве с Т.П. Кузнецовой [2] вновь рассматривается гипотеза не о ледниковом, а о внутригрунтовом генезисе этой залежи. Данный пример показывает, что при решении подобных задач даже тем же автором один и тот же объект в разное время может освещаться с разных позиций и причиной этого нередко служит односторонность оперирования известными данными. Целостность криосферы не подвергается сомнению, но иногда специалисты-мерзлотоведы не вникают в детали гляциологических разработок, специалисты-гляциологи — в тонкости многолетнего промерзания горных пород, а геологи-четвертиники — в проработки и тех, и других. При изучении объектов криосферы, как правило, декларируется междисциплинарный подход, но очень часто недостаточно учитывается взаимодействие мерзлотных и гляциальных процессов. Поэтому в вопросе о верификации внутригрунтового происхождения ластовых залежей подземного льда автор пытается осветить проблему с разных точек зрения.

Основные дискуссионные моменты и история вопроса

Суть проблемы заключена в специфике развития ледников в условиях холодного континентального климата Сибири. Общие черты этого рассмотрены автором ранее [3–5], здесь только отметим, что раньше базой построений служили альпийские схемы и в Сибири, согласно которым допускалось развитие ледниковых щитов. Уже в 1930–40-е годы эта схема подверглась критике (наиболее ёмко это выразил И.Г. Пидопличко [6], отметив гипертрофированность в восприятии былых ледников), а в 1950–60-е годы в период Международного геофизического года выяснилось, что к востоку от Урала работают схемы оледенения, отличные от альпийских. Однако и позже ряд авторов [7–9] создали на прежней основе модели древних покровных ледников в Сибири и их захоронения на длительное время.

Многолетние исследования автора показали, что в Сибири распространение ледниковых щитов нереально, а образования, принимаемые за их следы, имеют не ледниковый генезис [3–5]. Существующие разногласия по-прежнему отра-

жают спор вокруг концепции А.И. Воейкова [10], отрицающего широкое развитие ледников в глубине Сибири. Некоторые учёные [11, 12] стали оппонентами этой гипотезы. Позднее выяснилось, что благоприятная для оледенения высокая снежность препятствует развитию мерзлоты, а холодный континентальный климат способствует промерзанию пород, но противостоит широкому развитию ледников. Распространению ледников в Сибири мешают малая аккумуляция (в среднем она составляет до 50 г/см^2 в год, резко уменьшаясь в холодные периоды) и высокая летняя абляция.

Как известно, в Сибири господствует континентальный климат с очень тёплым летним периодом, что препятствует захоронению ледников. Ледниковые центры формируются здесь в горной местности, где потенциально способные бронировать лёд морены представлены преимущественно крупнообломочным материалом, сквозь который летом легко проникает тепло с жидкими осадками, воздухом и талыми водами, вызывая активное таяние льда. Сезонно-талый слой в такой толще даже в самых суровых условиях Сибири составляет 3 м и более [13, 14], и это, по мнению автора, препятствует формированию мощного ледникового покрова на большой площади. Поэтому при отступании ледников в тёплые периоды остаточные льды вытаивают за геологически короткое время (десятилетия — первые столетия).

При изучении мерзлоты в прошлом не всегда правильно применяли гляциологические знания, и даже когда в 1686 г., за столетие до создания альпийской школы гляциологии, в мёрзлых породах в Якутске прошли 28-метровую шахту, европейские гляциологи не признавали существование таких пород вплоть до середины XIX в. Признание пришло лишь после представления А.Ф. Миддендорфом данных о пройденной в 1837 г. 116-метровой шахте Шергина. Поэтому при первом объяснении находок залежей льда по берегам Арктики (судя по литературе — О.Е. Коцебу в 1816 г.), они были отнесены к погребённому фирну [15]. Позже А.Е. Фигурин [16] счёл большую их часть замёрзшей в морозобойных трещинах водой, а И.А. Лопатин [17] привёл для них отличия от снежных льдов. Вскоре Э.В. Толль [18] вновь объяснил все подземные льды снежным происхождением, и до 1950-х годов многие учёные поддерживали его взгляд, хотя уже в 1927 г. М.И. Сумгин в своём основополагающем труде [19] для большинства подземных льдов отме-

тил их внутригрунтовой генезис. Изменили взгляды лишь выявление полигонально-жильного генезиса многих льдов и создание [20–23] цельной концепции льдообразования, в немалой мере обеспеченной развитием мерзлотоведения.

Но преодолеть стереотипы непросто. Да и к гипотезе Э.В. Толля [18], чтобы обосновать в Сибири (в [7], например) ледниковые щиты, обращаются иногда и сейчас. Хотя и он, и его последователи писали не о щитах, а о фирновых полях малой мощности и о ледниках-снежниках, что в итоге легло в основу концепции пассивного оледенения [24]. Сыграла свою роль и этимология. Так, термин «пластовый лёд» сначала применялся для инъекционного льда (первоначально [23] был предложен термин «интрузивные пласты льда»). Затем акцент перенесли на форму льдов, и в исследовании [20] было уточнено, что относится к пластовым льдам надо крупные ледовые тела разного генезиса толщиной более 0,3–0,5 м. А когда в обрывах арктических берегов обнаружили многочисленные крупные залежи мощного льда не полигонально-жильного генезиса, то термин стал применяться и к ним. В 1960-е годы такие льды начали изучать на Чукотке, в Западной Сибири, в низовьях Енисея и на севере Америки [20, 21, 23, 25–27]. В итоге термин «пластовые льды» стал собирательным [28].

Многое дала обновлённая в конце XX в. геологическая съёмка. В частности, в Западной Сибири большинство исполнителей съёмки отвергли наличие здесь в прошлом ледниковых щитов [24, 29, 30], а детальные проработки новых [25, 31] и прежних [20, 21, 26] материалов изучения пластовых льдов исключили их ледниковый генезис. Вместе с тем обнаружение новых крупных залежей льда на побережье Арктики и не всегда ясное объяснение их генезиса с позиций мерзлотоведения привели к возобновлению споров и отнесению этих льдов к реликтам покровного оледенения Сибири [8, 9].

Методы исследования и использованные материалы

Главная причина противоречий в отношении прошлого — приписывание разного происхождения одному генетическому типу явлений. В нашем случае можно применить методологию Ш.Ш. Гасанова [21], отработанную на многих объектах, порождённых холодом. Суть её в том,

что противоречия легко разрешить, если строго придерживаться законов развития криосферы и применять принцип актуализма при переносе знаний о существующих объектах в прошлое. Согласно [21], для наших объектов есть два пути верификация гипотез: прямые экстраполяции и стратегия проверки. Первый путь применим, когда есть уверенность, что имеются современные аналоги объектов прошлого; второй путь предполагает объединение фактов в рамках не поддающегося наблюдению явления и построение его модели с помощью введения определённых допущений. Опираясь на методику, приведённую в [21], и на многолетний опыт работы в ключевых районах Сибири, автор провёл верификацию основных моделей погребения ледников и их анализ в свете концепции криоразнообразия [3].

Верификация возможных моделей погребения ледникового льда в Сибири

Анализ с позиций общих подходов. Сторонники ледникового генезиса пластовых льдов считают, что его консервация моренной в особых доказательствах не нуждается и часто ссылаются на М.М. Корейшу, описавшего [32] бронирование отступающих ледников криолитозоны. Но бронирование их не означает погребение на длительное время, а сам М.М. Корейша ледниковый генезис у пластовых льдов исключил [26]. Правда, существуют и переходные мнения: в [33] для большинства пластовых льдов Сибири упомянут внутригрунтовой генезис, но залежь «Ледяная гора» на Енисее сочтена реликтом ледника, спускавшегося с плато Путорана. В этой связи обратимся ещё раз к М.М. Корейше, который подчеркнул: «Очень заманчивые попытки объяснить генезис подземного льда действием одного механизма льдообразования, к сожалению, далеко не всегда могут привести даже к частному, региональному решению проблемы, не говоря уже о ее общем решении. ... Поиски чисто внешних аналогий в строении, например, ледниковых метаморфических льдов и деформированных подземных являются методической ошибкой» [26, с. 65–66]. Обвинить М.М. Корейшу в предвзятости к ледниковой гипотезе трудно — ледники он изучал долго. Добавим, что сегодня есть базовые сведения, обобщающие широкий спектр деятельности



Рис. 1. Ледник Азаровой, хр. Кодар. Июль 2013 г. Фото из архива В.С. Шейнкмана.

Пояснения см. в тексте

Fig. 1. Azarova Glacier, Kodar Range. July 2013. Photos from V.S. Sheinkman's archive.

Explanations see in the text

ледников [24, 34–37], и, опираясь на них, вполне реально раскрыть рассматриваемые явления.

Итак, для геологически длительной консервации ледникового льда среди мёрзлых толщ необходим теплозащитный покров. В Якутии, например, толщина сезонно-талого слоя в песчаных отложениях составляет около 1 м, а в мелкообломочных с заполнителем достигает 2,5 м и резко увеличивается в крупнообломочном материале [13, 14]. В Сибири среди морен преобладает крупно- и грубообломочный материал небольшой мощности, и летом, как мы уже отмечали, сквозь него с жидкими осадками, воздухом и талыми водами легко проникает тепло, поэтому мёртвый лёд быстро вытаивает даже в условиях низкотемпературных многолетнемёрзлых пород (ММП).

Потенциал погребения льда мореной приповерхностного мореносодержащего слоя. Ледник работает как конвейер: он перемещает сносимый на его поверхность со склонов осыпной материал. В результате образуется приповерхностный мореносодержащий лёд: его толщина и объём обломков зависят от активности их поступления и внедрения в лёд. У горных ледников поступление моренного материала весьма обильно, а следовательно, и потенциал погребения льда каменным покровом выше. Посмотрим, как это происходит на типичном для Сибири холодном леднике Азаровой в хр. Кодар, лежащем среди низкотемпературных ММП (рис. 1-*I*).

В области ледникового языка нет нисходящего движения льда. Летом в условиях Сибири крупные

обломки не успевают, компенсируя охлаждение ночью, накопить днём тепло для внедрения в лёд и лежат на нём, затеняя и предохраняя его на некоторое время от таяния. Плохо проникает в лёд и мелкозём — его частицы вбирают мало тепла и быстро отдают его льду, обычно залегая дисперсно. Мелкозём затемняет лёд, усиливая абляцию, но в случае образования локальных покрытий активное таяние льда может замедлиться. Обломки щебня днём успевают прогреться и внедриться на 10–20 см в лёд. Глубже обломки попадают редко — разве что через трещины. Масса такого материала невелика; обломки со склонов редко достигают центра области питания, где имеет место нисходящее движение льда. Обычно же в области питания оседает золовый мелкозём или вообще превалирует чистый лёд (см. рис. 1-*III*).

Лёд покрывается обломками лишь по периферии ледника и образует питаемую со склонов боковую морену, а поскольку ледник работает как конвейер, в стационарном случае он станет перегружаться обломками, создавая видимость мощного покрытия, хотя и в этом случае обломки лишь облекают лёд тонким слоем (см. рис. 1-*II*); в объёме же льда, содержащего морену, их доля обычно не превышает 25% [36]. Когда при отступании ледников бронирование охватит область абляции, сформируется абляционная морена, но она предохранит лёд ненадолго. В случае омертвления лёд стабилизироваться не может и, согласно расчётам Г.М. Фельдмана [13], должен вытаивать. В итоге маломощный слой обломков оказывается на

днище трога. На рис. 1, например, показано, что видимость мощного вала создают морены, покрывающие небольшим слоем лоб ледника и скальный ригель в краевой его части, сформировавшиеся ещё в малый ледниковый период, но в этом случае и лёд ледника, и породы скального ригеля могут проглядывать сквозь обломки. Холмисто-моренный рельеф из крупных насыпных форм — это атрибут большого ледника, перерабатывающего равнины со значительной толщиной осадков. Такой ледник предполагается, например, в моделях оледенения на Русской равнине, но в Сибири подобного нет, поскольку здесь отсутствуют условия и для формирования ледниковых щитов, и для выхода ледников на равнины вообще [3–5].

Если, используя подход [21], строго придерживаться методологии актуализма, то следует признать, что скоплений обломков, способных стать теплозащитным плащом, сохраняющим лёд на геологически длительное время, на ледниках не наблюдается нигде. Это вытекает из опыта работы и автора в ледниковых районах Сибири [3–5], и других исследователей [30, 38, 39]. Чаше погребены могут быть иные ледовые тела, например, при активном перемещении мелкодисперсного материала на блоки речного или наледного льда, особенно многолетнего. Так, наледи могут оказаться в области воздействия селей разного генезиса, материал которых после отложения становится плотным и будет неплохим теплоизолятором.

Интересный пример даёт наблюдаемая автором уже много лет Чарская впадина, находящаяся ниже ледников хр. Кодар. Отложения впадины дренирует р. Чара, вскрывая песчаную толщу осадков древнего ледниково-подпрудного озера. В центре и на востоке впадины песок защищён растительным покровом, скован мерзлотой, и здесь [3], отражая глубокое промерзание пород при среднегодовой температуре воздуха около $-7 \div -8$ °С, встречаются полигонально-жильные льды (ПЖЛ), но на её западе песчаные отложения обнажены, перевеяны и в итоге стали доступны для прямого проникновения в них тепла с жидкими осадками и воздухом. В результате сейчас эти отложения представляют собой массив талых пород и их состав намного менее грубый, чем у моренных отложений.

Поскольку ситуации в случае горного и покровного оледенения существенно различаются, рассмотрим рис. 2, где показаны два разных ледника — покровный с выводным потоком (см.

рис. 2-*I*) и горный (см. рис. 2-*II*). На покровном леднике источник поступающих обломков — редкие останцы-нунатаки, обтекаемые льдом, и его борта (при наличии), расположенные далеко друг от друга. В краевой зоне ледника по плоскостям внутренних сколов поднимаются также отдельные порции придонного мореносодержащего льда [40], но их мощность невелика, и внешне ледники выглядят чистыми даже в выводных потоках. В этом случае в основном по периферии ледника накапливается донная морена (которая на выводных ледниках выдавливается [36] и к их бортам) и в ней тоже преобладает материал, не препятствующий, согласно [13], проникновению сквозь него летнего тепла. В данной ситуации при формировании абляционной морены она будет содержать не так много обломков и в любом случае не станет фактором погребения на длительное время льда ледников в случае их омертвления.

Сравним сказанное с ситуацией на леднике, отображённом на рис. 2-*II*. Это — вполне представительный ледник: во-первых, есть надёжные свидетельства о его прошлом, во-вторых — это крупный, находящийся среди ММП холодный ледник с установленными характеристиками. (Здесь на подошве слоя нулевых колебаний вблизи границы питания лёд охлаждён до -14 °С, а на языке до -4 °С, и со всех сторон ледник окружён ММП [3, 5].) При потеплении ледник бронируется мореной, так как к нему поступает намного больше обломочного материала, чем у покровных ледников. Немалую долю вносит и образуемая при слиянии составляющих ледник потоков срединная морена. В середине XX в. ледник соединялся со спускающимся из соседней долины ледником Левый Актру, а в конце XIX в. — и с другими ледниками долины Актру. Но все они, несмотря на залегание в зоне глубокого промерзания горных пород, в настоящее время разделены пространством в несколько километров, а ледниковый лёд на леднике вытаял из-под морены, по свидетельству очевидцев, уже в первые десятилетия [41]. В настоящее время в её толще фиксируются только текстуры, отражающие последующее промерзание пород.

Ещё характерный пример — долина Чаган-Узун в зоне алтайского минимума температур воздуха (-62 °С) с Софийским ледником, одним из крупнейших на Алтае. Кратко он охарактеризован в работе [3], здесь мы приведём данные наблюдений автора за несколько десятилетий,

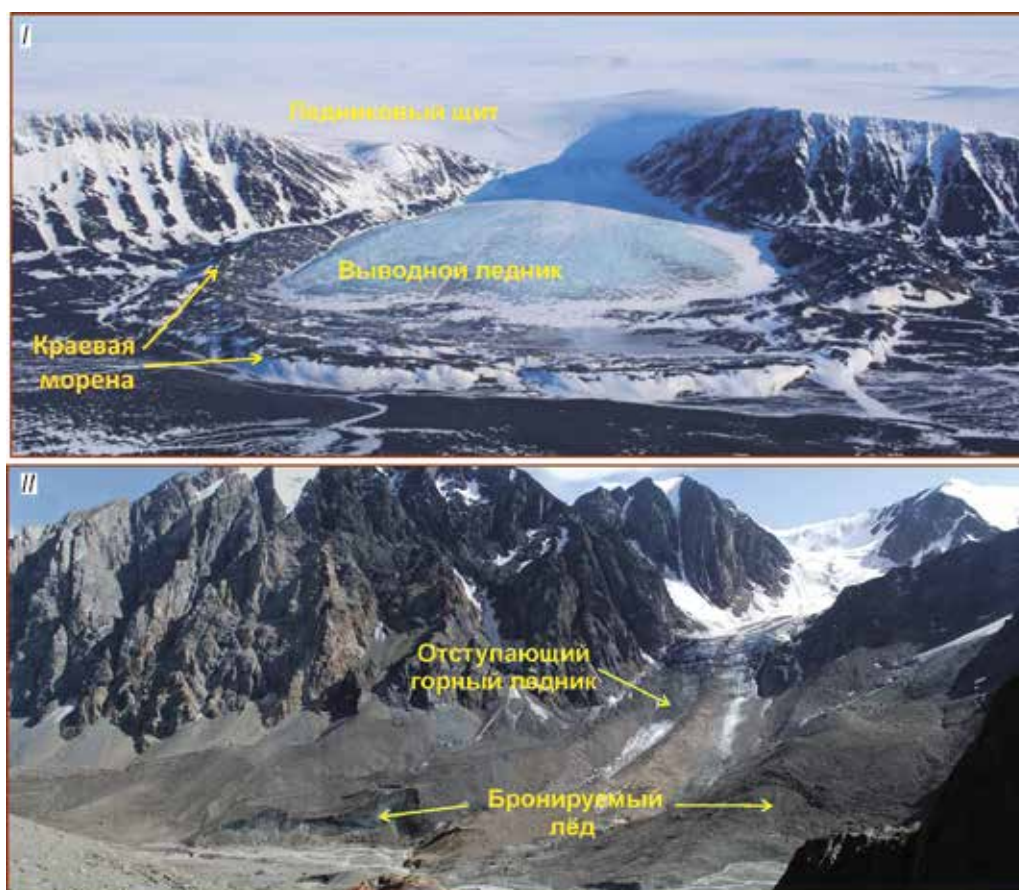


Рис. 2. Различный характер моренного покрытия покровных и горных ледников.

I – тело покровного ледника Астрономический (на заднем плане) и его выводной поток (на переднем плане), Новая Земля; фото из архива <https://www.google.ru/search?q=ледник+новая+земля&newwindow>; *II* – ледник Большой Правый Актру, Северо-Чуйский хребет. Алтай, июль 2011 г., фото из архива В.С. Шейнкмана

Fig. 2. Unequal character of moraine cover at ice sheets and mountain glaciers.

I – body of the Astronomicheskii Glacier (in the background) of Novaya Zemlya ice sheet, and its outlet glacier (in the foreground); photo from the archive of <https://www.google.ru/search?q=ледник+новая+земля&newwindow>; *II* – Bol'shoi Praviy Aktru Glacier, North Chuyskiy Range. Altai, July 2011, photo from V.S. Sheinkman's archive

подчеркнув следующее. По долине есть данные наблюдений В.В. Сапожникова [42], а в 2003 г. здесь произошло землетрясение, по следам которого автору удалось провести наблюдения. В зоне свежих деформаций удалось отследить (рис. 3) скрытое прежде строение мёрзлых морен и иных толщ, которые выделялись оттаиваемой, тёмной и влажной поверхностью, но погребённые льды не были обнаружены нигде. Как обычно, встречались лёд-цемент и маломощные инъекционные льды, фиксировавшиеся чаще, чем ранее, так как блоковая тектоника вызывала перераспределение потоков подземных вод и внедрение их в новых местах. Аналогичная ситуация характерна и для ледника Софийского. За долиной автор наблюдает более 30 лет. Ситуация с моренами малого

ледникового периода за эти годы менялась мало, так как на данном отрезке долины погребённый ледниковый лёд давно вытаял (рис. 4). Согласно данным В.В. Сапожникова [42], в 1898 г. от нижнего края оз. Акколь до ледника было 150 м, а в 1911 г. ледник упирался в верхний край озера, ниже которого из-под морены виднелись блоки невытаявшего ледникового льда. Менее чем через полстолетия ледник от озера, как было установлено преемниками В.В. Сапожникова, уже отстоял более чем на 1 км, а ниже озера весь погребённый под мореной лёд вытаял [41].

Потенциал погребения льда мореной придонного мореносодержащего слоя. В придонной части ледников формируется другой тип мореносодержащего льда. Он связан с основной мореной,

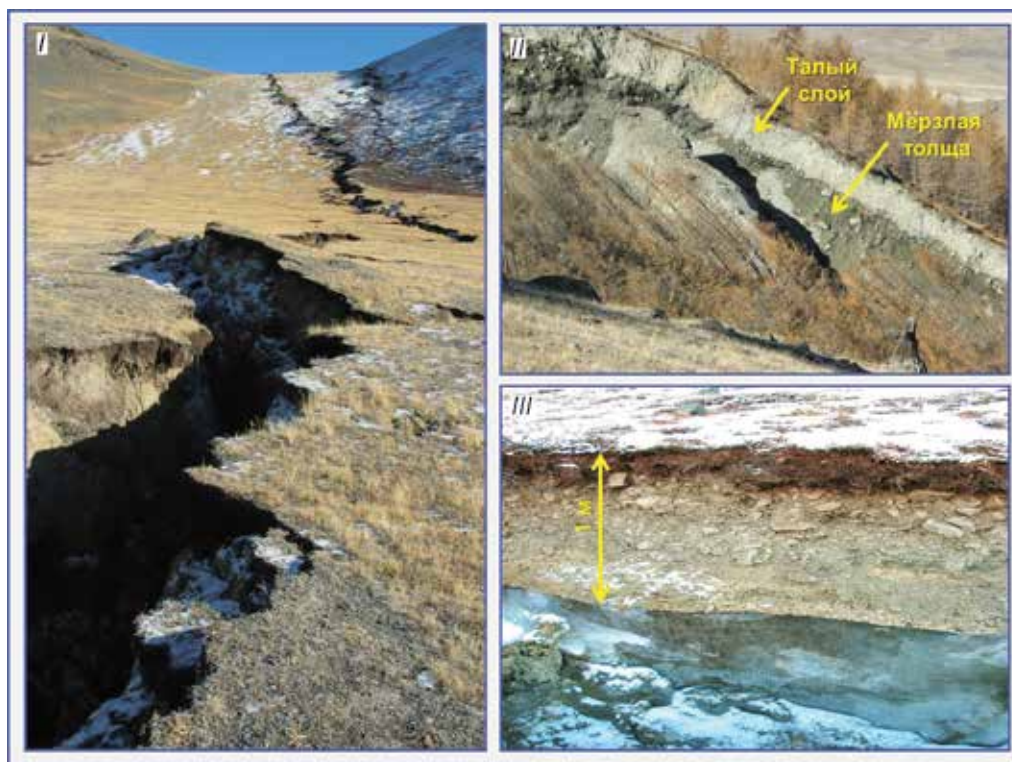


Рис. 3. Следствие тектонических деформаций горных пород в результате землетрясения 2003 г. в верховьях долины р. Чаган-Узун, Южно-Чуйский хребет, Алтай. Фото из архива В.С. Шейнкмана

Пояснения см. в тексте

Fig. 3. Consequence of tectonic deformations in rocks as a result of the earthquake in 2013 in the upper reaches of the Chagan-Uzun Valley, South Chuyskiy Range, Altai. Photos from V.S. Sheinkman's archive.

Explanations see in the text

и в Сибири о нём, скорее, нужно говорить как о мёрзлой высокольдистой толще. Объём базальной морены, как выясняется сегодня, невелик — об этом свидетельствует и опыт работы автора на разных ледниках, и проведённый им анализ литературы. К тому же строение многих ледников уже вскрыто бурением [39].

Начнём анализ с ледниковых щитов. Долгое время считалось, что на их ложе в морено-содержащем льду много обломков и его толщина сопоставима с мощностью ледников. Сегодня установлено, что такие оценки завышены, и это связано со стереотипным восприятием ледников по облику их краевой, перегруженной мореной зоны: она в первую очередь предстаёт взгляду исследователей, и такие ледники обычно запоминаются. Уже при изучении деятельности ледников по программе МГГ (1957–1960 гг.) в Антарктиде заметная толща придонного льда с разными обломками (включая отдельные валуны) была зафиксирована лишь у края выводных ледников.

Мощность такого льда относительно толщины ледникового тела оказалась несопоставимо малой (30–40 м). Его слои в местах соединения потоков льда иногда составляли 100–150 м, но обломки выглядели как дисперсный мелкозём [41]. А доля обломков в морено-содержащем льду только у самого днища ледника достигала 25%, составляя в целом не более 2%. После вытаявания они распределяются в виде базальной морены толщиной около 70 см, лишь в отдельных местах достигая 1–3 м [41]. Позднее антарктический лёд был пройден серией скважин, и как в отдалении от краевой части выводных ледников, так и на шельфе керны практически по всей толще льда были чистые — только у самого ложа фиксировались маломощные (первые метры) слои льда с мелкозёмом [24, 38, 39]. Причём лишь отдельные частицы в нём измерялись миллиметрами.

Таким образом, за пределами краевой зоны выводных ледников не удалось обнаружить лёд с заметной долей обломочного материала. При-

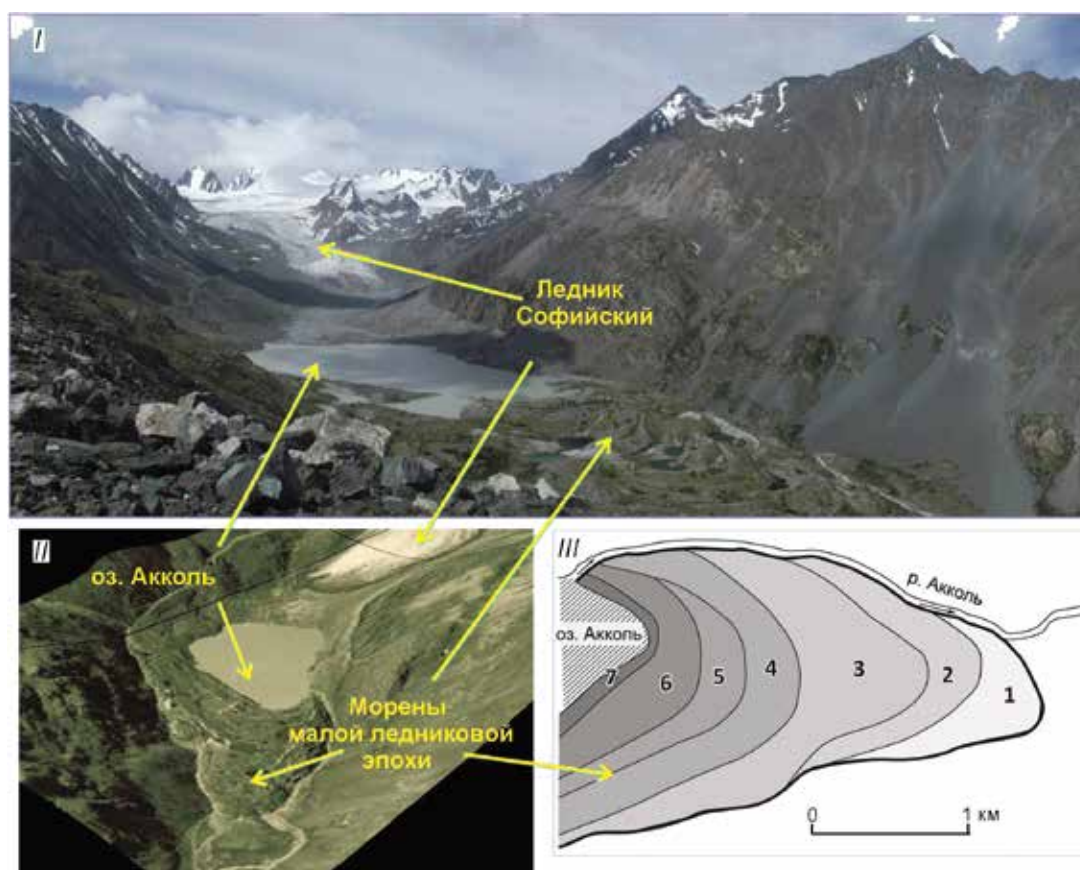


Рис. 4. Ледник Софийский и моренный комплекс малой ледниковой эпохи вблизи него, Южно-Чуйский хребет, Алтай. Фото из архива В.С. Шейнкмана

I – общий вид на ледник и моренный комплекс вблизи него, июль 2013 г.; *II* – трёхмерная модель долины на основе системы Google; *III* – совместная с Ю.В. Паржаюком реконструкция разных положений ледника по данным геоморфологической и лишенометрической съёмки: 1 – начало XVII в., 2 – середина XVII в., 3 – конец XVII – начало XVIII в., 4 – середина XVIII в., 5 – конец XVIII – начало XIX в., 6 – середина XIX в., 7 – конец XIX в.

Fig. 4. Sofiyskiy Glacier and nearby Little Ice Age moraine complex. Photos from V.S. Sheinkman's archive.

I – general view of glacier and nearby moraine complex, July 2013; *II* – three-dimensional model of the valley at the base of the Google system; *III* – jointly with Y.V. Papzhayuk reconstruction of different state of the glacier by data of geomorphological and lichenometric survey: 1 – beginning of XVII century, 2 – middle of XVII century, 3 – end of XVII century – beginning of XVIII century, 4 – middle of XVIII century, 5 – end of XVIII century – beginning of XIX century, 6 – middle of XIX century, 7 – end of XIX century

чина в том, что, когда рельеф подчинён оледенению, ледники в форме каравая распределяют своё воздействие более-менее равномерно по ложу, откуда морена подпитывается обломочным материалом. Те же черты выявлены на ледниках островной Арктики, многие из которых также пройдены бурением. Здесь я сошлюсь на опубликованные обзоры [24, 30, 38, 39] и для примера рассмотрю свежие материалы [43] по 3054-метровому керну гренландской скважины GISP-2. Придонный лёд в керне имел возраст около 300 тыс. лет, был охлаждён до -9°C и приморожен к ложу. Лишь непосредственно у ложа был обнаружен слой льда толщиной всего

около 0,5 м с мелкими валунами. Выше находился 13-метровый слой с рассеянными алевритовыми частицами, а остальной лёд был чистым.

Большая толщина базального мореносодержащего льда отмечена в Арктике и также лишь в краевой части ледников: его 35–40-метровая толща описана, например, на ледниках Шпицбергена [44], причём отмечено, что из неё образуется слой морены толщиной в первые метры. Ледники Шпицбергена находятся под влиянием Атлантики, и они в Арктике единственные двухслойные – холодные у поверхности, но лежат на нёмёрзлом ложе. Такое ложе эродирует сильнее холодного [35, 37], но наблюдения на тёплых и двухслой-

ных ледниках показали [34, 44], что существенных отличий в объёме моренообразования у них нет.

Придонный мореносодержащий лёд лучше выражен на горных ледниках. Они подпружены в своих трогах и по всему поперечному профилю больше соприкасаются с ложем. Базальная морена получает питание здесь и собственно с ложа, и с подлёдной части его бортов. Чётко выражена на горных ледниках и зона экзарации на участке подлёдного ригеля вблизи границы питания. Он истирается более активно, и обломки пород отрывать с него потоку льда легче.

Однако известно, что толщина придонного льда, содержащего морену, даже на крупнейших ледниках измеряется лишь первыми метрами, а объём обломков в нём достигает 25% [24, 34, 36, 39]. Морена, продуцируемая в основном в зоне экзарации, затем распределяется вдоль ложа ледникового языка, а некоторая её доля выдавливается с днища к бортам, поэтому максимальное накопление происходит в краевой части, где в конечном счёте формируется конечно-моренный комплекс. Так или иначе, значимые результаты изучения моренообразования на ледниках [36] убедительно показали, что обломочного материала в придонной части ледников в целом продуцируется немного, и в любом случае под слоем льда, содержащего морену, нет мощных блоков чистого льда. Ни о каком потенциальном захоронении здесь на долгое время пластов льда большой толщины речи идти не может. Принципиально не меняет, как отмечено ранее, эту картину и определённое увеличение доли обломков в краевой части ледника.

Сторонники ледникового генезиса пластовых льдов, однако, отмечают, что в случаях, подобных приводимым здесь, речь идёт о ледниках, текущих по прочному скальному ложу. Они же рассматривают ситуацию, когда ледник растекается по равнине, где осадочные породы легко абсорбируются потоком льда и могут формировать плащ отложений, консервирующих ледник. Но это всего лишь умозрительные построения, и они противоречат существующим данным. Отметим ещё раз: раскрытые в Сибири закономерности формирования гляциальных образований не позволяют ледникам, с одной стороны, формировать образования крупнее долинных и существовать вне горно-ледниковых центров, а с другой — все ледники Сибири сегодня лежат на

мёрзлом основании и соответственно таковыми они были и в криохроны квартера [3–5].

Сцементированные льдом мёрзлые осадки очень прочные, и в случае течения по ним льда его воздействие мало отличается от ситуации на коренном ложе. Тем более, основные модели показывают [24, 35–37], что сцепление мореносодержащего слоя с мёрзлым основанием велико и ощутимые сдвиговые деформации имеют место в слоях ледника, лежащих существенно выше ложа, а на ложе преобладают процессы истирания и отламывания отдельных выступающих частей. (Вместе с тем заметим, что при сравнении с такими ледниками не прослеживается заметное повышение моренообразования и на ложе тёплых ледников [36, 44]). В целом, имеющиеся факты показывают, что в Сибири специфика формирования ледниковых отложений состоит в отсутствии обломочных покровов большой мощности и даже в условиях сплошной мерзлоты первично включённые в них или бронируемые ими блоки ледникового льда после отмирания ледников вытаскивают за геологически быстрое время.

Особо отметим формирование валунных суглинков. Именно их используют обычно как индикатор ледниковых отложений, причём часто в качестве механизма формирования предполагают для европейского ледникового щита в квартере, но это трудно сопоставить с ситуацией в Сибири. По наблюдениям автора, такие суглинки образуются в краевой части ледника на конечной стадии развития базальной морены после её перемещения на данный участок — когда большая часть льда в ней уже вытаяла. Образуются они, если ледник вырабатывает достаточно много ледниковой муки, т.е. продукта перетирания обломков, движимых по скальному или мёрзлому днищу трога. В объёме продуцируемых ледником осадков количество таких продуктов невелико, но они накапливаются в базальной морене в краевой части ледника при его отмирании, когда таяние достигает придонных слоёв ледника и межвалунные полости в местах вытаивания льда начинают заполняться дисперсным материалом. Частицы муки, захваченные с другим мелкозёмом талыми водами, проходят с ним через базальную морену как через фильтр и оседают, заполняя оставшиеся поры. Но если этот фильтр станет легко проницаемым для талых вод, как это имеет место на начальных этапах формиро-



Рис. 5. Чередующиеся отложения основной морены и ледниково-речных осадков в разрезах среднего течения долины Чаган-Узун, Южно-Чуйский хребет, Алтай. Фото из архива В.С. Шейнкмана

Fig. 5. Alternating basal till and glacial-river deposits in the sections of middle reaches of the Chagan-Uzun Valley, South Chuiskiy Range, Altai. Photos from V.S. Sheinkman's archive

вания конечной морены (когда в ней превалирует грубый материал), то ледниковая мука выносится в реки в виде взвеси и те приобретают белёсый цвет. Валунные суглинки — это уплотнённая порода. Имея теплозащитные свойства, они не участвуют в активном бронировании льда и формируются в слоях, где фактически нет чистого льда, — из маломощного содержащего морену придонного льда, когда налагаемый сверху материал не мешает прохождению сквозь него тепла. Так что в любом случае захоронённые пласты льда здесь формироваться не могут.

Образуемые валунные отложения с тонкодисперсным заполнителем в зависимости от размеров, положения в рельефе и длительности стационарного стояния ледника могут иметь разную мощность, которая при циклическом развитии оледенения и наложении различных генераций валунных суглинков друг на друга может достигать нескольких метров. В разрезах они могут быть включены в сложно построенные многометровые тела из морен разного возраста и представлены характерными горизонтами, где валуны взвешены в тонком мелкозёме, образуя атакситовую текстуру. Это кардинально отличает их от чередующихся с ними ледниково-речных (обычно гравийно-галечных) осадков — промытых, слоистых, сортированных обломков с черепитчатым

залеганием, у которых самый тонкий мелкозём в заполнителе вымыт активно тёкшими водотоками. Типичный пример — обнажение в среднем течении долины Чаган-Узун в 30 км ниже Софийского ледника (рис. 5). Добавим, что суглинки — это плотная порода и она способна при промерзании разбиваться сеткой ПЖЛ. Следов таких льдов в разрезах на рис. 5, находящихся на юге Западной Сибири, нет (там промерзание пород не достигало порога образования ПЖЛ), но точнее, в Западной Туве, где холоднее, псевдоморфозы по таким льдам в толщах морен криохрона МИС-2 выражены неплохо [3].

По поводу хорошо промытых, разрозненных, периодически встречающихся на севере Западной Сибири валунно-галечных россыпей, принимаемых сторонниками ледниковых щитов за реликты морен, автором уже не раз было показано, что это — итог типичного для сибирских рек ледово-речного разноса [4, 5]. Данному фактору не всегда уделяется должное внимание, но в действительности это активно протекающий геологический процесс, для которого захват и перемещение на большое расстояние крупных обломков и предметов — обычное явление (рис. 6). В частности, к северу от Средней Оби валуны представлены породами, вынесенными, как показали исследования автора, с правобере-



Рис. 6. Последствия ледохода в г. Томск и его окрестностях.

I – набережная р. Томь: россыпи перенесённых на 800 км с Кузнецкого Алатау валунов на коренных долеритовых дайках и обломки бетонных балок, захваченных и перемещённых ледоходом; *II* – перемещение ледоходом захваченных им дачных домиков; *III* – ледоходная атака на набережной г. Томск с захватом и перемещением различных предметов; *IV* – перемещение ледоходом захваченного им экскаватора. *I* – фото из архива В.С. Шейнкмана, сентябрь 2016 г.; *II–IV* – фото из архива ОАО «Геомониторинг» за 2010 г., г. Томск

Fig. 6. Effect of ice-floe drift in Tomsk and its suburbs.

I – the quay of the Tom' River: placer of boulders displaced at a distance of 800 km from Kuznetskiy Alatau on the dolerite dyke bedrock, and fragments of concrete beams captured and dislocated by ice-floe drift; *II* – displacement of captured cottages by ice-floe drift; *III* – displacement of a captured excavator by ice-floe drift; *IV* – ice-floe drift attack at the Tomsk quay with capturing and displacement of different objects. *I* – photo from V.S. Sheinkman's archive. September 2016; *II–IV* – photos from the ОАО «Geomonitring» archive for 2010, Tomsk

жья Енисея, причём не только с плато Путорана, но и из районов, где вообще нет следов древних ледников, – с междуречья Нижней и Подкаменной Тунгуски, а также с Енисейского края.

Верификация моделей формирования собственно ледяных льдов. Рассмотрим непосредственно залежи льда, порой относимые к ледниковым реликтам. Для примера возьмём презентацию В.И. Соломатина в <http://www.ticor2012.org>, где показаны различные залежи льда на севере Сибири, относимые им к ледниковым реликтам. Отдавая должное заслугам этого исследователя в изучении подземных льдов, отметим, что нередко он замыкается в рамках своей гипотезы. Об этом упоминалось в литературе не раз, например в [2, с. 88]: «Глав-

ным доказательством глетчерной природы льда у В.И. Соломатина является сам лед – на нем сконцентрировано основное внимание автора. В то же время В.И. Соломатин не делает попытки с той же степенью детальности проанализировать перекрывающую толщу, условия её накопления».

Отнести в прибрежной Арктике отложения, консервирующие ледяные залежи и покрывающие часто их ровную столообразную поверхность, причём нередко только слоем тонкодисперсных пород небольшой мощности (как это представлено, например, в <http://www.ticor2012.org> для ситуации с ледяной залежью на побережье Карского моря в Байдарацкой губе – она отображена на рис. 7-1), к продукту деятельно-

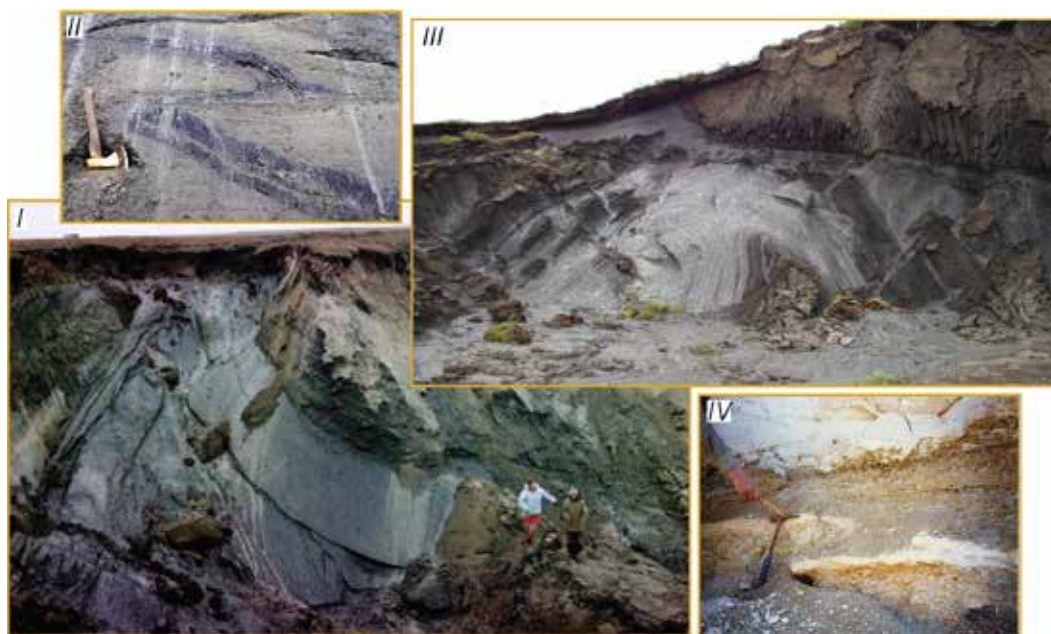


Рис. 7. Залежи пластового льда с различными дислокациями его слоёв на Арктическом побережье Сибири (I–III) и одна из дислокаций в монолитных меловых карбонатных породах (IV) в бассейне Мёртвого моря. Пояснения см. в тексте.

I – залежь пластового льда на побережье Карского моря, Байдарацкая губа; II – залежь пластового льда на побережье Западного Таймыра; III – медленное горизонтальное зигзагообразное смещение слоёв льда в толще залежи, отображённой на вставке I; IV – медленное горизонтальное зигзагообразное смещение слоёв льда в толще монолитных меловых карбонатных пород в бассейне Мёртвого моря. Фото I и III из архива <http://www.ticop2012.org>; II – из архива ИКЗ СО РАН; IV – из архива В.С. Шейнкмана

Fig. 7. Bedded ice massifs with their different dislocations of layers at the Arctic sea coast of Siberia (I–III) and one of dislocations in monolith Cretaceous carbonate rock in the Dead Sea basin (IV). Explanations see in the text.

I – a bedded ice massive at the Kara Sea coast, the Baidaratskaya inlet; II – a bedded ice massive at the Western-Taimyr coast; III – a slow horizontal zigzagging displacement of ice layers in the ice body presented in the inset I; IV – a slow horizontal zigzagging displacement of layers in monolith Cretaceous carbonate rock in the Dead Sea basin. Photos I and III from the archive of <http://www.ticop2012.org>; II – from the archive of Earth Cryosphere Institute, Siberian Branch, RAS; IV – from V.S. Sheinkman's archive

сти ледника в свете изложенного выше неправомерно. На ледниках Сибири нет механизмов ни для оформления ровных столообразных поверхностей, ни для наложения на них отмеченного покрова, тем более что многими исследователями его происхождение убедительно обосновано как морское или аллювиальное [24–26].

В презентации <http://www.ticop2012.org> как признак ледникового генезиса залежей приведено наличие в них зигзагообразных смещений льда (см. рис. 7-III). Причины дислокаций льда могут быть разные, но, как точно подмечено Д.Ю. Большиновым [24], сторонниками ледниковой гипотезы вывод обычно делается по такой схеме: если дислокации есть, то они гляциотектонические и для доказательства оледенения покровного типа больше ничего не требуется. Не повторяя деталей анализа [24], добавим только, что небольшие, как

на рис. 7-III, без крупных разрывных нарушений дислокации пород – это атрибут их очень медленного смещения (миллиметры, редко – первые сантиметры в год), как в аналогичном случае карбонатных пород на рис. 7-IV (он приведён для сравнения с рис. 7-III). Свойственны подобные явления многим пластичным породам в тектонически активных районах, но при более высоких скоростях смещения слоёв даже в пластичных породах нарушения будут разрывными.

В Сибири скорость даже у медленно текущих холодных ледников около 10 м в год, т.е. для них характерны смещения льда гораздо больше, чем на рис. 7-III, с превышением порога пластичности льда, что приводит к разрывным нарушениям. В частности, как итог движения льда по плоскостям внутренних сколов они описаны в [40]. Сторонники ледникового генезиса залежей всё же

относят к гляциальным формам и встречающиеся изогнутые, в виде складок небольших размеров слои льда (см. рис. 7-*II*). Однако хрупкость льда, проявляемая уже при небольших скоростях течения ледников, не позволит ему изгибаться в такие мелкие формы, тем более на холодных ледниках — им свойственны будут разрывные дислокации. Характерный пример — раскалывающие толщу льда (см. рис. 1-*III*) трещины при обтекании ледниками подлёдных ригелей. В виде складок течения текстуры встречаются только на очень крупных ледниках, при больших размерах складок. Например, отмечены они при геофизическом зондировании Антарктиды, где складки растянуты на километры, а их амплитуда измеряется сотнями метров [45]. Причины изогнутости слоёв пластовых льдов в виде дислокаций малой амплитуды и мелких крутых складок следует искать в воздействии процессов, протекающих крайне медленно; они как раз характерны для длительного промерзания горных пород, которое сопровождается различными пластическими деформациями. Этому посвящена обширная литература, и хотя многое в этих процессах, которые очень сложны, пока не раскрыто, путь решения проблемы лежит в дальнейшем их изучении.

Отметим также, что ряд химических и физических характеристик залежей льда могут трактовать в свою пользу и противники, и сторонники их внутригрунтового генезиса. Но первые из них обычно обходят вопрос о не характерных для льда ледников свойствах таких залежей. Например — присущее многим спорным пластовым залежам на севере Сибири высокое содержание бора, свойственное морским льдам [31], или принципиально иной, по сравнению с ледниковым льдом, набор палинологических спектров [25, 31]. С учётом закономерностей, фиксирующих отсутствие возможностей для распространения ледников вне горных сооружений Сибири [3–5], такие факты говорят сами за себя.

Заключение

В итоге многолетних исследований автором установлено, что криоразнообразие в Сибири в четвертичный период повсеместно было представлено тесно взаимодействующими ММП и горными ледниками. Единство холодного мира проявлялось здесь в виде перекрёстных связей

порождаемых холодом явлений, когда каждый из элементов криоразнообразия формировался в поле их взаимодействия, строго определённом законами организации образуемой ими системы. Все эти элементы переплетены историей и процессом своего развития, и на перекрестии их характеристик удалось выявить весьма информативные показатели и выяснить, что, несмотря на приуроченность к области хорошо развитой криолитозоны, ледники в Сибири не могли при бронировании мореной и последующем отмирании быть погребены на геологически длительное время.

Опираясь на вскрытие закономерностей развития современных мерзлотно-гляциальных геосистем, автору удалось достаточно уверенно провести экстраполяцию данных и получить надёжные характеристики объектов, не наблюдаемых ныне. Условия холодного континентального, но с тёплым летом климата, когда поведение ледников контролирует ограниченная аккумуляция и чуткая реакция на ритмику «термохрон—криохрон» с шагом около 20 тыс. лет, повсеместно в Сибири не позволяли её холодным ледникам достичь форм больше долинных потоков льда. За геологически короткие криохроны они не успевали продвинуться дальше предгорий, а затем, быстро освобождая долины в термохроны, не получали возможность сформировать на них плащ отложений с хорошими теплозащитными свойствами, способный сохранять лёд длительное время.

Причина — в плохих теплозащитных свойствах моренного материала и его малом продуцировании ледниками. Это подтверждается и многолетними наблюдениями автора в ключевых районах Сибири, и новейшими данными бурения и обследования большого числа ледников, выполненного другими исследователями. Так или иначе, при отступании ледников их реликты в виде погребённого льда сохранялись недолго, обычно в течение одного — полутора веков. Даже учитывая, что характер многих залежей льда до конца ещё не ясен, особенно в плане сложного взаимодействия мерзлотных процессов, допущения сторонников покровного оледенения Сибири о реальности сохранения его реликтов в виде пластовых льдов не могут быть приняты. Тем более, что многолетние исследования автором различных мерзлотно-гляциальных систем Сибири показали, что образования, принимаемые за следы такого оледенения, имеют иное происхождение.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке программы партнёрских проектов Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН с Тюменским государственным университетом и с Тюменским индустриальным университетом.

Acknowledgements. The paper has been fulfilled under the support of the partner projects between the Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Research Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, and Tyumen State University, and Tyumen Industrial University.

Литература

1. Карпов Е.Г. Подземные льды Енисейского Севера. Новосибирск: Наука, 1986. 134 с.
2. Кузнецова Т.П., Карпов Е.Г. Условия формирования ледоминального комплекса Ледяной горы. Якутск: изд. ИМ СО АН СССР, 1989. 172 с.
3. Шейнкман В.С., Мельников В.П. Ледники Сибири как компонент криолитогенно-гляциальных геосистем // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 2. С. 3–23.
4. Шейнкман В.С., Плюснин В.М. Оледенение севера Западной Сибири: спорные вопросы и пути их решения // Лёд и Снег. 2015. № 1 (129). С. 103–120. doi: 10.15356/IS.2015.01.09.
5. Sheinkman V. Quaternary glaciation in North-Western Siberia: New evidence and interpretation // Quaternary International. 2016. V. 420. P. 15–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.147>
6. Пидопличко И.Г. О ледниковом периоде: Вып. 1. Киев: Изд-во АН УССР, 1946. 171 с.
7. Гросвальд М.Г. Арктика в последний ледниковый максимум и в голоцене — океанские выбросы, материковые и морские льды, их движение и связь с климатом // МГИ. 2004. Вып. 96. С. 47–54.
8. Каплянская Ф.А., Тарноградский В.Д. Гляциальная геология. Л.: Недра, 1993. 328 с.
9. Соломатин В.И. Физика и география подземного оледенения. Новосибирск: Гео, 2013. 346 с.
10. Воейков А.И. Климатические условия ледниковых явлений, настоящих и прошедших // Записки Минералогического общества. Сер. 2. Ч. 16. СПб., 1881. С. 21–90.
11. Обручев В.А. Признаки ледникового периода в Северной и Центральной Азии // Избранные работы по географии Азии: Т. 3. М.: Географгиз, 1951. С. 49–128.
12. Черский И.Д. К вопросу о следах древних ледников в Восточной Сибири // Изв. Вост.-Сиб. отдела Императорского Русского Географического общества. 1882. Т. 12. № 4–5. С. 28–62.
13. Фельдман Г.М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. Новосибирск: Наука, 1977. 190 с.
14. Васильев И.С. Закономерности сезонного протаивания грунтов в Восточной Якутии. Новосибирск: Наука, 1982. 136 с.

References

1. Karpov E.G. Podzemnye l'dy Yeniseyskogo Severa. Underground ice of the North Yenisei area. Novosibirsk: Nauka, 1986: 134 p. [In Russian].
2. Kuznetsova T.P., Karpov E.G. Usloviya formirovaniya ledomineral'nogo kompleksa Ledyanoy gory. Conditions of forming the ice-mineral complex of the Ledyanaya Gora (Ice Hill). Yakutsk: Institute of Permafrost, Siberian Branch, RAS, 1989: 172 p. [In Russian].
3. Sheinkman V.S., Melnikov V.P. Ledniki Sibiri kak komponent kriolitogennno-glyatsial'nykh geosistem. Glaciers of Siberia as a component of cryogenic-glacial geosystems. Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere. 2014, XVIII (2): 3–23. <http://www.izdat-geo.ru> (In Russian).
4. Sheinkman V.S., Plusnin V.M. Oledenenie severa Zapadnoy Sibiri: spornye voprosy i puti ikh resheniya. Glaciation of North-Western Siberia: discussion questions and ways for their solution. Led i Sneg. Ice and Snow. 2015, 1 (129): 103–120. doi: 10.15356/IS.2015.01.09. [In Russian].
5. Sheinkman V.S. Quaternary glaciation in North-Western Siberia — New evidence and interpretation. Quaternary International. 2016, 420: 15–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.147>.
6. Pidoplichko I.G. O lednikovom periode. About the Glacial Period. V. 1. Kiev: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1946: 171 p. [In Russian].
7. Grosvald M.G. Arktika v posledniy lednikoviy maksimum i v golotsene — okeanskije vybrosy i morskije l'dy, ikh dvizhenie i svyaz' s klimatom. Arctic during the Last Glacial maximum and Holocene — ocean discharges, continental and sea ice, their movement and relationship with climate. Materialy glatsiologicheskikh issledovaniy. Data of Glaciological Studies. 2004, 96: 47–54. [In Russian].
8. Kaplyanskaya F.A., Tarnogradskiy V.D. Glatsial'naya geologiya. Glacial geology. Leningrad: Nedra, 1993: 328 p. [In Russian].
9. Solomatin V.I. Fizika i geografiya podzemnogo oledeneniya. Physics and geography of underground glaciation. Novosibirsk: Geo, 2013. 346 p. [In Russian].
10. Voeikov A.I. Klimaticheskie usloviya lednikovyx yavleniy, nastoyashchikh i proshedshikh. Climatic conditions of modern and past glacial phenomena. Zapiski Mineralogicheskogo Obshchestva. Transactions of Mineralogical Society. Ser. 2. Pt. 16. Sankt-Petersburg, 1881: 21–90. [In Russian].
11. Obruchev V.A. Priznaki lednikovogo perioda v Severnoy i Tsentral'noy Azii. Showings of the Glacial Period in North and Central Asia. Izbrannye raboty po geografii Azii. Selected works on geography of Asia. V. 3. Moscow: Geografiz, 1951: 49–128. [In Russian].
12. Cherskiy I.D. K voprosu o sledakh drevnikh lednikov v Vostochnoy Sibiri. To the question on evidence of ancient glaciers in Eastern Siberia. Izvestia Vostochno-Sibirskogo otdela Imperatorskogo Russkogo Geograficheskogo obshchestva. Transactions of the East-Siberian Branch of the Imperial Russian Geographical Society. 1882, 12 (4–5): 28–62. [In Russian].

15. Коцебу О.Е. Путешествия вокруг света. М.: Дрофа, 2011. 966 с.
16. Фигурин А.Е. Извлечение из записок медико-хирурга Фигурина, веденных во время описи берегов Северо-Восточной Сибири // Записки Российского Адмиралтейства: Т. V. СПб., 1825. С. 259–328.
17. Лопатин И.А. Некоторые сведения о ледяных слоях в Восточной Сибири // Приложение 1 к XXIX тому Записок Императорской Академии Наук. СПб., 1876. С. 3–32.
18. Толль Э.В. Ископаемые ледники Новосибирских островов, их отношение к трупам мамонтов и к ледниковому периоду // Записки Императорского Русского Географического общества. 1897. Т. XXXII. № 1. С. 130–152.
19. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. Владивосток: изд. Дальневосточной геофизич. обсерватории, 1927. 369 с.
20. Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 215 с.
21. Гасанов Ш.Ш. Синтез криолитологического знания. М.: Наука, 1984. 88 с.
22. Попов А.П. Мерзлотные явления в земной коре (криолитология). М.: Изд-во МГУ, 1967. 304 с.
23. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
24. Большианов Д.Ю. Пассивное оледенение Арктики и Антарктиды. СПб.: изд. ААНИИ, 2006. 296 с.
25. Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: ГЕОС, 2002. 248 с.
26. Корейша М.М., Хименков А.Н., Брыксина Г.С. О происхождении пластовых залежей подземного льда на севере Западной Сибири // МГИ. 1981. Вып. 41. С. 62–66.
27. Mackay J.R. The origin of massive ice beds in permafrost; Western Arctic Coast, Canada // Canadian Journ. of Earth Science. 1971. V. 8. № 4. P. 397–422.
28. Пластовые льды криолитозоны / Ред. А.И. Попов. Якутск: изд. ИМ СО АН СССР, 1982. 140 с.
29. Гусев Е.А., Костин Д.А., Маркина Н.В., Рекант П.В., Шарин В.В., Доречкина Д.Е., Зархидзе Д.В. Проблемы картирования и генетической интерпретации четвертичных отложений арктического шельфа России (по материалам ГГК41000/3) // Региональная геология и металлогения. 2012. № 50. С. 5–14.
30. Кузин И.Л. Геоморфология Западно-Сибирской равнины. СПб.: изд. Государственной поллярной академии, 2005. 176 с.
31. Feldman G.M. Prognoz temperaturnogo rezhima gruntov i razvitiya kriogennykh protsessov. Prognosis of ground temperature regime and development of cryogenic processes. Novosibirsk: Nauka, 1977: 190 p. [In Russian].
32. Vasiliev I.S. Zakomernosti sezonnogo protaivaniya gruntov v Vostochnoy Yakutii. Regularities of seasonal thawing the grounds in Eastern Yakutia. Novosibirsk: Nauka, 1982: 136 p. [In Russian].
33. Kotsebu O.E. Puteshestviya vokrug sveta. Travels around the world. Moscow: Drofa, 2011: 966 p. [In Russian].
34. Figurin A.E. Izvlechenie iz zapisok mediko-khirurgu Figurina, vedennykh vo vremya opisi beregov Severo-Vostochnoy Sibiri. Extract from the notes of medical surgeon Figurin, carried out during description of North-Eastern Siberian coast. Zapiski Rossiyskogo Admiralteystva. Transactions of Russian Admiralty. V. 5. Sankt-Petersburg, 1825: 259–328. [In Russian].
35. Lopatin I.A. Nekotorye svedeniya o ledyanykh sloyakh Vostochnoy Sibiri. Some data about ice layers in Eastern Siberia. Prilozhenie № 1 k XXIX tomu Zapisok Imperatorskoy Akademii Nauk. Attachment № 1 to the XXIX volume of Transaction of Imperial Academy of Sciences. Sankt-Petersburg, 1876: 3–32. [In Russian].
36. Toll' E.V. Iskopaemye ledniki Novosibirskikh ostrovov, ikh ot-noshenie k trupam mamontov i k lednikovomu periodu. Fossil glaciers of Novosibirsk Islands, their relationship with mammoth corpses and the glacial period. Zapiski Imperatorskogo Russkogo Geograficheskogo obshchestva. Transactions of the Imperial Russian Geographical society. 1897, XXXII (1): 130–152. [In Russian].
37. Sumgin M.I. Vechnaya merzlota pochvy v predelakh SSSR. Permafrost of soils in the bounds of the USSR. Vladivostok: Far East Geophysical Observatory, 1927: 369 p. [In Russian].
38. Vtyurin B.I. Podzemnye l'dy SSSR. Ground ice of the USSR. Moscow: Nauka, 1975: 215 p. [In Russian].
39. Gasanov S.S. Sintez kriolitologicheskogo znaniya. Synthesis of cryolithological knowledge. Moscow: Nauka, 1984: 88 p. [In Russian].
40. Popov A.I. Merzlotnye yavleniya v zemnoy kore (kriolitologiya). Permafrost phenomena in the Earth crust (cryolithology). Moscow: MSU, 1967: 304 p. [In Russian].
41. Shumskiy P.A. Osnovy strukturnogo ledovedeniya. Foundation of structural ice knowledge. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1955: 492 p. [In Russian].
42. Bol'shiyanov D.Y. Passivnoe oledenenie Arktiki i Antarktidy. Passive glaciation of Arctic and Antarctica. Sankt-Petersburg: AARI, 2006: 296 p. [In Russian].
43. Dubikov G.I. Sostav i kriogennoe stroenie merzlykh tolshch Zapadnoy Sibiri. Composition and cryogenic structure of permafrost in Western Siberia. Moscow: GEOS, 2002: 248 p. [In Russian].
44. Koreisha M.M., Khimenkov A.N., Bryksina G.S. O proiskhozhdenii plastovykh zalezhei podzemnogo l'da na severe Zapadnoy Sibiri. On origin of bedding ice bodies in the North of Western Siberia. Materialy glatsiologicheskikh issledovaniy. Data of Glaciological Studies. 1981, 41: 62–66. [In Russian].
45. Mackay J.R. The origin of massive ice beds in permafrost; Western Arctic Coast, Canada. Canadian Journ. of Earth Science. 1971, 8 (4): 397–422.
46. Plastovye l'dy kriolitozony. Bedding ice of cryolithozone. Ed. A.I. Popov. Yakutsk: Institute of Permafrost, 1982: 140 p. [In Russian].
47. Gusev E.F., Kostin D.A., Markina N.V., Rekant P.V., Sharin V.V., Dorechkina D.E., Zarkhidze D.V. Problemy kartirovaniya i geneticheskoy interpretatsii chetvertichnykh otlozheniy arkticheskogo shelfa Rossii (po materialam

31. Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Палинологическая индикация неглетчерного происхождения пластовых льдов // Инженерная геология. 2010. № 1. С. 24–38.
32. Корейша М.М. Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 170 с.
33. Шполянская Н.А. Плейстоцен-голоценовая история развития криолитозоны Российской Арктики глазами подземных льдов. Москва—Ижевск: изд. Ин-та компьютерных исследований, 2015. 370 с.
34. Лаврушин Ю.А. Строение и формирование морен материковых оледенений. М.: Наука, 1976. 237 с.
35. Патерсон У.С.Б. Физика ледников. М.: Мир, 1984. 473 с.
36. Серебряный Л.Р., Орлов А.В., Соломина О.Н. Морены — источник гляциологической информации. М.: Наука, 1989. 236 с.
37. Boulton G.S. Theory of glacial erosion, transport and deposition as a consequence of subglacial sediment deformation // Journ. of Glaciology. 1996. V. 42. № 140. P. 43–62.
38. Чувардинский В.Г. Результаты сквозного разбуривания ледниковых покровов Арктики и Антарктиды и их значение для решения проблем четвертичного периода // Изв. РГО. 2012. Т. 144. Вып. 2. С. 28–41.
39. Talalay P.G. Subglacial till and bedrock drilling // Cold Regions Science and Technology. 2013. V. 86. P. 142–166. doi: 10.1016/j.coldregions.2012.08.009.
40. Евтеев С.А. Геологическая деятельность ледникового покрова Восточной Антарктиды. М.: Наука, 1964. 120 с.
41. Тронов М.В. Очерки оледенения Алтая. М.: Географиз, 1949. 376 с.
42. Сапожников В.В. Пути по русскому Алтаю. Томск: Типо-литография Сибирского Товарищества Печатного дела, 1912. 169 с.
43. Bierman P.R., Corbett L.B., Graly J.A., Neumann T.A., Lini A., Crosby B.T., Rood D.H. Preservation of a preglacial landscape under the center of the Greenland Ice Sheet // Science. 2014. V. 344. P. 402–405. doi: 10.1126/science.1249047.
44. Гляциология Шпицбергена / Ред. С.А. Житникова. М.: Наука, 1985. 200 с.
45. Марков А.Н. Геолого-геофизическая модель слоистой структуры и динамики ледникового покрова Восточной Антарктиды: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геол.-минер. наук. СПб.: Санкт-Петербургский гос. геол. институт им. Г.В. Плеханова, 2009. 20 с.
- GGK41000/3). Problems of mapping and genetic interpretation of Quaternary deposits in the Russian Arctic shelf (on the material of GGK41000/3). *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*. Regional geology and metallogeny. 2012, 50: 5–14. [In Russian].
30. Kuzin I.L. *Geomorfologiya Zapadno-Sibirskoy ravniny*. Geomorphology of the West-Siberian Plane. Sankt-Petersburg, Edition of the Government Polar Academy, 2005: 176 p. [In Russian].
31. Vasil'chuk A.K., Vasil'chuk Y.K. *Palinologicheskaya indikatsiya negletchernogo proiskhozhdeniya plastovykh l'dov*. Palynological indication of non-glacier origin of bedding ice bodies. *Inzhenernaya geologia*. Engineering Geology. 2010, 1: 24–38. [In Russian].
32. Koreysa M.M. *Sovremennoe oledenenie khrebt Suntar-Khayata*. Modern glaciation of Suntar-Khayata Range. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1963: 170 p. [In Russian].
33. Shpolyanskaya N.A. *Pleistotsen-golotsenovaya istoriya razvitiya kriolitozony Rossiyskoy Arktiki glazami podzemnykh l'dov*. Pleistocene–Holocene history of permafrost development of Russian Arctic by eyes of underground ice. Moscow–Izhevsk: Institute of Computer Studies. 2015: 370 p. [In Russian].
34. Lavrushin Yu.A. *Stroenie i formirovanie moren materikovykh oledenieniy*. Structure and formation of continental glaciations. Moscow: Nauka, 1976: 237 p. [In Russian].
35. Paterson W.S.B. *Fizika lednikov*. The physics of glaciers. Moscow: Mir, 1984: 473 p. [In Russian].
36. Serebryaniy L.R., Orlov A.V., Solomina O.N. *Moreny — istochnik glyatsiologicheskoy informatsii*. Moraines are issues of glaciological information. Moscow: Nauka, 1989: 236 p. [In Russian].
37. Boulton G.S. Theory of glacial erosion, transport and deposition as a consequence of subglacial sediment deformation. *Journ. of Glaciology*. 1996, 42 (140): 43–62.
38. Chuvarbinskiy V.G. *Rezultaty skvoznogo razburivaniya lednikovykh pokrovov Arktiki i Antarktidi i ikh znachenie dlya resheniya problem chetvertichnogo perioda*. Results of through drilling the Arctic and Antarctic ice sheets and their significance for solving of problems of the Quaternary. *Izvestiya RGO*. Transactions of Russian Geographical Society. 2012, 144 (2): 28–41. [In Russian].
39. Talalay P.G. Subglacial till and bedrock drilling. *Cold Regions Science and Technology*. 2013, 86: 142–166. doi: 10.1016/j.coldregions.2012.08.009.
40. Evteev S.A. *Geologicheskaya deyatel'nost' lednikovogo pokrova Vostochnoy Antarktidi*. Geologic activity of the East Antarctic Ice Sheet. Moscow: Nauka, 1964: 120 p. [In Russian].
41. Tronov M.V. *Ocherki oledeneniya Altaya*. Essays on the Altai glaciation. Moscow: Geografiz, 1949: 376 p. [In Russian].
42. Sapozhnikov V.V. *Puti po Russkomu Altayu*. Routes across Russian Altai. Tomsk: Tipo-litografiya Sibirskogo Tovarishchestva pechatnogo dela. Printing and lithographic house of Siberian partnership of print business, 1912: 169 p. [In Russian].
43. Bierman P.R., Corbett L.B., Graly J.A., Neumann T.A., Lini A., Crosby B.T., Rood D.H. Preservation of a preglacial landscape under the center of the Greenland Ice Sheet. *Science*. 2014, 344: 402–405. doi: 10.1126/science.1249047.
44. *Glatsiologiya Shpitsbergena*. Glaciology of Svalbard. Ed. S.A. Zhhitnikova. Moscow: Nauka, 1985: 200 p. [In Russian].
45. Markov A.N. *Geologo-geofizicheskaya model sloistoy struktury i dinamiki lednikovogo pokrova Antarktidi*. Geological-geophysical model of laminated structure and dynamics of Eastern-Antarctic ice sheet. PhD thesis. St.-Petersburg Plekhanov State Geol. Institute. СПб., 2009. 20 p. [In Russian].