



Лед – это твердое состояние веществ, которые в приповерхностных условиях Земли обычно являются жидкостями или газами.

На Земле в естественном ледяном виде может находиться вода и значительно реже – гидраты природных газов, главным образом метана CH_4 и диоксида углерода CO_2 . Общая формула гидратов природных газов $\text{ПГ} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, где ПГ – молекула природного газа, а n – число молекул воды. Гидраты природных газов встречаются в районах вечной мерзлоты и на дне океанов при отрицательных температурах и давлениях не меньше 25 бар (примерно 25 атм).

Водяной лед. Общие сведения

Плотность чистого *водяного льда* (далее – *лед*) при температуре 0°C и давлении 1 атм равна 916,8 кг/м³. При увеличении давления плотность льда несколько увеличивается. В основании Антарктического ледникового щита в местах мощностью 4200 м, плотность льда достигает 920 кг/м³. Плотность льда увеличивается и при понижении температуры.

Под значительным давлением вода переходит в твердое состояние при температуре выше 0° . Экспериментально показано, что под давлением в 20 600 атмосфер лед остается твердым при температуре до $+76^\circ\text{C}$.

Объем воды при замерзании увеличивается на 10%, что вызвано особенностями водородных связей льда. Поэтому лед плавает в жидкой воде.

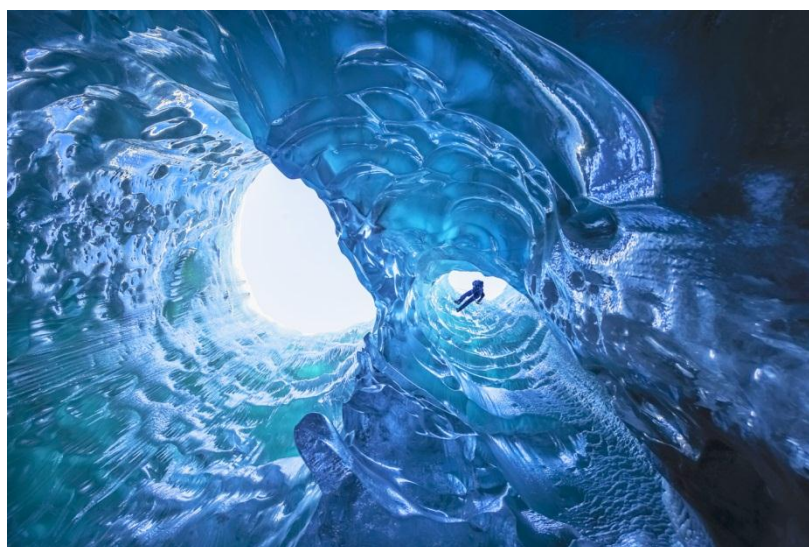
Водяной лед на Земле находится при температуре, которая соответствует температуре железа при белом калении. Железо при такой температуре должно деформироваться подобно водяному льду.

При соприкосновении и сжатии двух кусков льда они смерзаются – это свойство называется **режеляцией (смерзаемостью)**. Под действием местных повышенных давлений на контактах двух кусков льда может происходить некоторое плавление льда. Образующаяся при этом вода выдавливается в места, где давление меньше, и там

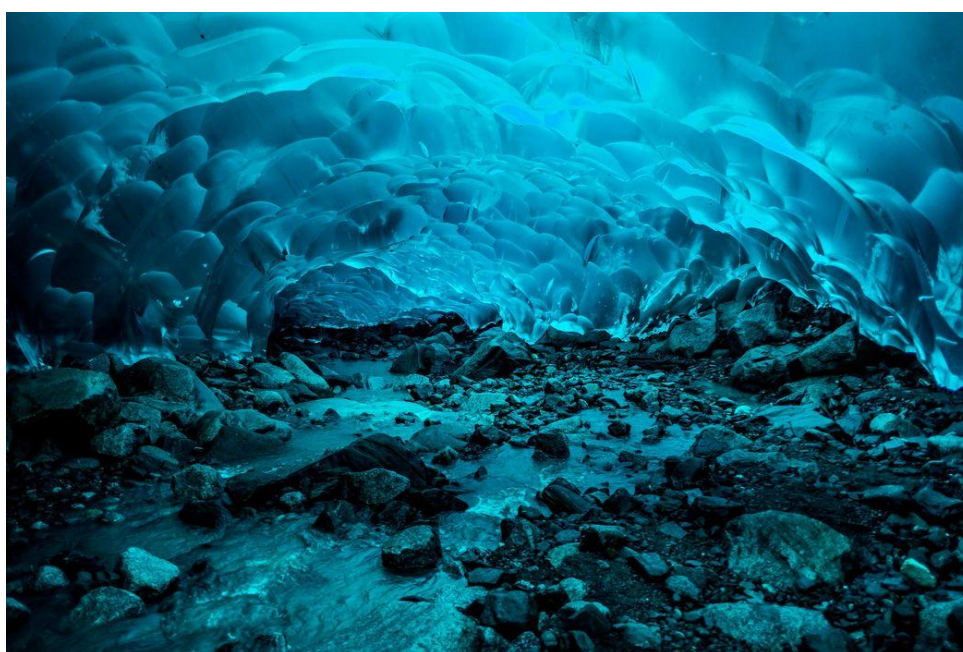
замерзает. Смерзание ледяных поверхностей может происходить и без давления, и без участия жидкой фазы.

Благодаря режеляции трещины в ледяных покровах и массивах способны "залечиваться" и трещиноватый лед может превращаться в монолитный.

Изменение структуры и текстуры льда под воздействием термодинамических процессов называется **метаморфизмом льда**. Метаморфизм льда наиболее полно выражается при смерзании пухлого свежего снега и превращении его на конечном этапе в массивный прозрачный лед. При ледяном метаморфизме происходят смещения, деформации, изменения формы и размеров кристаллов. В целом метаморфизм льда выражается в росте среднего размера кристаллов. По мере увеличения размеров кристалла интенсивность перекристаллизации замедляется.



Спуск в недра ледника Менделхолл. Аляска. mshcdn.com



Внутри ледника Менделхолл. Mendenhall.thousandwonders.net

Ледяные кристаллы одноосны, оптически положительны, обладают свойством двойного преломления, при этом у них самый низкий показатель преломления из всех известных минералов. В результате двойного лучепреломления световой поток в кристалле поляризуется. При прохождении через лед свет рассеивается и световая энергия переходит в тепловую, вызывая нагрев и таяние льда. Рассеянный свет придает льду голубые и зеленые оттенки. Белый цвет льда обусловлен наличием во льду большого количества мелких воздушных пузырьков.

Лед не допускает в свою кристаллическую решетку другие вещества. Такое свойство в природе уникально. Все примеси располагаются на границе кристаллов льда, либо в виде отдельно группирующихся кластеров.



*Замерзшая глинистая вода. Глина обособливается между кристаллами льда. Фото
Александр Бабкин*

В зависимости от условий образования, температуры и давления насчитывается **3 аморфных вида льда и 15 видов кристаллического льда**. Многие из этих видов существуют на Земле в естественных условиях. Можно предположить, что остальные виды, полученные в лабораторных условиях, могут существовать в естественном виде на других планетах. Наиболее распространенным в природе является лед с гексагональной упаковкой атомов, образующийся при температуре $-0,01$ град. С. **Важной особенностью молекулярной структуры этого вида является концентрация молекул вблизи плоскостей перпендикулярных к главной оси гексагональной решетки. Такие плоскости именуются базисными. Разрушение сплошности льда по этим плоскостям происходит с разрывом двух молекулярных связей, а вдоль любой другой плоскости процесс разрушения идет с**

разрывом четырех связей. Если направление давления не совпадает с базисной плоскостью, то наряду со сдвигом происходит изгиб кристаллов. Поэтому скольжение ледяного массива по базисным плоскостям требует в десять раз меньшего напряжения. Однако при температуре льда близкой к плавлению, сдвиги происходят одинаково легко по всем направлениям.

Лед на поверхности Земли находится в интервале температур от 0 до -90 град. С, поэтому молекулярное строение кристаллов льда постоянно изменяется под действием постоянно изменяющейся температуры, а также под действием давления, которое повышается по мере накопления ледовых толщ.

Увеличение размеров кристаллов льда сопровождается уменьшением прочности ледового массива. Со временем кристаллы льда, слагающие ледники, увеличиваются в размерах, и тогда соответственно повышается ползучесть ледников.

Идеальный лед без примесей, нарушений строения, и без слоистой макроструктуры является весьма прочным веществом, но постоянное наличие во льдах обломков горных пород, разного рода загрязнений и слоистой макроструктуры объясняет, почему даже низкие напряжения вызывают во льду пластические деформации.

Процессы деформации ледовых масс подразделяют на **этап первичной ползучести**, когда происходит вязкоупругая деформация упрочнения; **вторичной ползучести**, которая является переходным процессом между этапами деформации упрочнения и ускоряющейся деформацией разупрочнения (скорость деформирования льда в этом случае постоянна); и этап **третичной ползучести**, характеризующийся начальным ускорением разупрочнения и разрушением массы льда.

Горные ледники

Крупнейшие ледники горного типа, то есть имеющие в основном вытянутые формы, располагаются в Центрально-Азиатской горной системе (Гималаи, Каракорум, Кунь-Лунь, Памир, Тянь-Шань) и на севере северо-американских Кордильер.

Ледники образуются при накоплении снега, не растаявшего в течение теплого периода года, дальнейшем уплотнении снега до фирна и последующей кристаллизации до сплошного льда. Фирн – это плотный смерзшийся снег. Летом, когда снег тает, снежинки сплавляются, вода от растаявшего на поверхности снега просачивается в снежно-фирновые толщи, где ночью смерзается. Кроме того в превращении снега в фирн участвует сублимация – кристаллизация пара при испарении льда. По мере накопления следующих пластов снега фирн уплотняется. При превращении снега в лед происходит значительное его уплотнение: 1 кубический метр льда образуется из 10-11 кубометров снега.

Область питания горных ледников, то есть область накопления льда располагается в верхней части ледника. Лед накапливается при двух условиях – достаточно низкой температуре воздуха и большом количестве выпадающего снега. Так при незначительных годовых снежных осадках, хотя и при низких отрицательных температурах, в центральных районах Анд на 20-х градусах южной широты, ледники имеют весьма незначительное распространение даже на высотах свыше 6000 метров над уровнем океана. В то же время в южных Андах на 40-х градусах южной широты ледники имеют повсеместное распространение и опускаются до уровня океана.



Центральные Анды. Фото Омар Гобби



Южные Анды. Язык ледника Exploradores на высоте 170м над уровнем моря на широте 46град. 30мин. Фото Horacio Parrague

Имеет значение экспозиция горных склонов, где накапливается лед. На южных склонах (в южном полушарии на северных) высота ледниковой (снеговой) границы формирования ледников находится значительно выше, чем на северных склонах из-за угла падения солнечных лучей. Разница может достигать почти 1 километра по вертикали в одном районе. **Положение края и объем ледника изменчивы, что обусловлено количеством выпадающего снега.**

Массы льда под давлением приобретают пластичные свойства и под собственной тяжестью сползают вниз в виде ледниковых языков по депрессивным понижениям тектонического или водно-эрозионного происхождения. Лед, несмотря на пластичность, реагирует на быстрые напряжения как хрупкое тело, в котором возникают трещины и сколы. Поэтому ледники не только плавно изгибаются, но и трескаются при крутых изгибах в соответствии со скальным рельефом не редко с образованием ледопадов. Чем обильнее питание фирнового бассейна, то есть область питания ледника, тем длиннее ледник и тем выше скорость его сползания. **Скорость движения ледника в целом различна и может быть относительно равномерной или прерывистой.** Так на Памире было зафиксировано передвижение ледника со скоростью до 150м в сутки. Это вызвано неравномерным накоплением льдов во времени и быстрой, по сравнению со скоростью накопления фирна и льда, **гравитационной разрядкой ледника.**

Гравитационная разрядка тела ледника может проходить сложным образом. Начинаясь на одном из участков ледника, подвижка льдов распространяется из верхней зоны в языковую зону. Ледник может дробиться на крупные блоки, утончаться в срединной части потока, а в языковой части хаотично вздыбливаться. При этом возникают боковые разломы льда вдоль бортов, образуются ледовые складки, изгибаются срединные морены.

Летом скорости движения льда выше, чем зимой, днем выше, чем ночью. В теплое время года и суток в леднике и у его ложа скапливается вода, играющая роль смазки.

Скорость движения горных льдов неравномерна и в поперечном сечении тела ледника. Средние части ледника, где мощность льда больше, движутся быстрее; краевые, менее мощные и испытывающие трение о борта долины, перемещаются медленнее. В результате таких неравномерных продольных перемещений в леднике образуются продольные трещины.



Ледник на острове Элсмир. Канадский Арктический архипелаг. Фото Jerry Kobalenko



Оледенение в Центральном Тянь-Шане. Фото Александр Бабкин

Лед деформируется при малой нагрузке, но если эта нагрузка действует длительное время. **Ледники обычно состоят из нескольких пластин, которые под воздействием небольших напряжений легко перемещаются относительно друг друга.** Под постоянным однонаправленным давлением в леднике кристаллы льда, представляющие собой стопку тончайших листочков прилегающих друг к другу в базисной плоскости, деформируются в направлении базисной плоскости гораздо легче, чем в любом другом направлении. В процессе движения кристаллы постепенно приобретают упорядоченную структуру

параллельную направлению движения ледника. В том же направлении наблюдается и сплющивание воздушных пузырьков в теле ледника. При касательных напряжениях 1кг на 1 квадратный см во льду образуются сколы – тогда скольжение пластин льда происходит вдоль плоскостей сколов. При больших вертикальных нагрузках и температурах близких к нулю в теле ледника, лед на плоскостях скольжения подтаивает, что способствует скольжению ледяных пластин льда по внутриледниковым сколам.

Кроме этого – **если температура ледника у ложа ниже плавления (таяния), то скольжение льда у ложа не происходит.** Придонные слои ледников, имеющих температуру ниже точки плавления, не движутся, так как они приморожены к ложу. Скольжение ледника по скальному дну может происходить только при условии донного таяния льда, потому что прочность смерзания льда с горными породами превышает прочность льда и при отрицательных температурах движение возможно только при разрывах внутри льда. Например, Гренландский ледниковый щит приморожен к ложу и его придонная часть не движется.

Наблюдения за искривлением ствола скважин в горных и покровных ледниках показали: нижние слои льда в 2-10 раз движутся медленнее, чем вышележащие слои. При таком механизме движения ледника вышележащие толщи блокируют перемещение нижних слоев, и тогда появляются вопросы о перемещении обломков горных пород донными частями горных ледников и тем более разрушение скального ложа.

До сих пор не выяснено соотношение разрушающей (эродирующей) роли льда и водных потоков в формировании ущелий и общего разрушения горных сооружений. С одной стороны мы наблюдаем очевидные и многочисленные геологические следы эродирующей работы ледников, но с другой стороны льды явно не способны самостоятельно выпахивать ущелья и разрушать горы из-за весьма пластичных свойств льда, частой примороженности донной части ледников к скальному ложу и смазочной роли воды в случае положительной температуры дна ледника.

Можно предположить, что основную роль в разрушении горных массивов играет образование трещиноватости из-за неравномерного расширения и сжатия горных пород при изменении температуры, особенно при температуре около 0 градусов. Дальнейшее растрескивание происходит при попадании в первичные трещины воды, которая замерзает в ночное время (причем почти круглый год) оказывая давление на трещины. Сильно растрескавшиеся разрушенные горные массы затем смещаются с места ледниками при положительных температурах придонных слоев ледника даже при не очень больших давлениях, что видно по фотографиям, иллюстрирующим итоги ледниковой деятельности. Кроме того ледники транспортируют значительное количество обломочного материала осыпающегося на ледниковую поверхность с прилегающих горных склонов.

Пожалуй, более значительную работу по перемещению, а также окатыванию обломков, производят катастрофические селевые водо-грязе-каменные потоки, образующиеся при прорыве водоемов в приледниковых районах. Сель разрушает горный массив и

размывает ранее отложенный ледником разрушенный материал, который откладывается в моренах. **Морена** – это скопление грубообломочного материала образованное при движении ледника, который транспортирует обломки вниз по ходу своего движения. Морена включает в себя бесформенные обломки пород различных размеров от 10-15 метров до песка и глин. Морены имеют форму вытянутых полос или валов на фронтальной границе ледникового языка и располагаются как внутри, так и на поверхности ледников. Наблюдения показывают, что в полярных долинных ледниках мощные морены имеются в тех местах, где ледники движутся по рыхлым отложениям. Там, где ледники движутся по коренным породам, толщина морен резко уменьшается или обломки отсутствуют вовсе.



Верхняя горная долина справа, очевидно, вырезана ледником. Разрушительная работа водных потоков в этом случае была незначительна из-за небольшого количества льда. Южно-Джунгарский хребет. Казахстан



При стаивании ледника обломочный материал, находившийся внутри ледника и на его поверхности, оседает в виде конечной морены. Заилийский Алатау. Северный Тянь-Шань. Фото Александр Бабкин

Для ледникового льда характерна зернистость и полосчатость. Зерна ледникового льда представляют собой кристаллы неправильной формы, тесно примыкающие друг к другу. Такой лед называют поликристаллическим. Кристаллы поликристаллического льда со временем увеличиваются, а их число уменьшается за счет процессов перекристаллизации и режеляции. Размеры кристаллов увеличиваются также с глубиной, с удалением от источников питания и с уменьшением напряжений в ледниковой толще.

Размеры ледяных кристаллов колеблются от долей миллиметров до десятков сантиметров в поперечнике. На Земле Франца-Иосифа и в Гренландии находили кристаллы диаметром до 16 см и весом 500-700 г.

Полосчатость льда образована чередованием зимних более чистых слоев и летних слоев, часто загрязненных пылью и песком. В связи с разной плотностью и загрязненностью слоев их таяние происходит с разной скоростью, в результате чего поверхность ледника становится ребристой.



Ребристая поверхность ледника. Северный Тянь-Шань. Фото Александр Бабкин

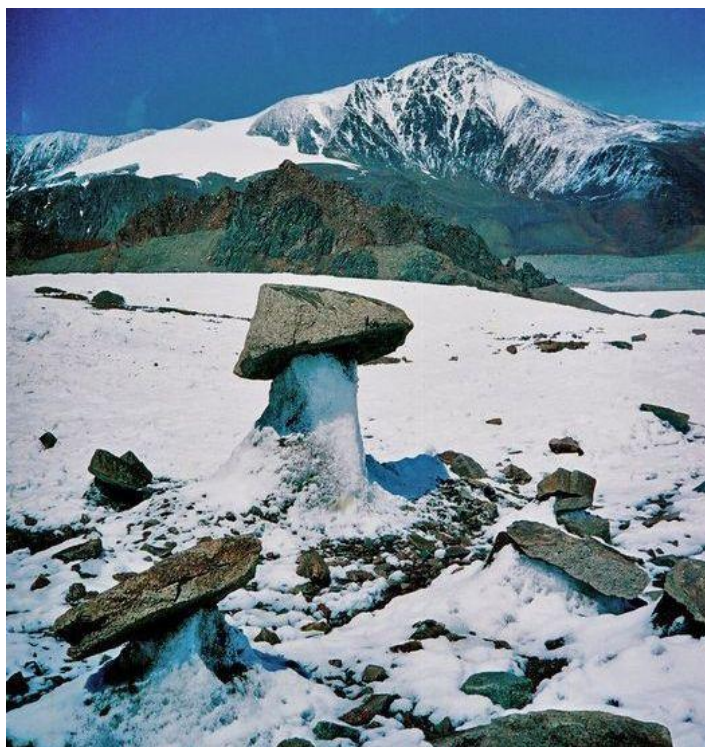
По числу и расстоянию между полосами можно определить приблизительную скорость движения ледника. Чередование темных и светлых слоев, а также поверхностные и внутриледниковые слои морен образуют рисунок на поверхности ледника, который формируется неравномерным плоскостным (пластинчатым) движением льда. **Ледниковые сезонные слои параллельны плоскостям перемещения ледника – у бортов они приобретают крутое падение до вертикального положения, у дна слои залегают горизонтально.** В конце ледника, на его языке, из-за более быстрого перемещения срединной части тела ледника, слои образуют дуги, выпуклые стороны которых обращены в направлении движения льда, а по бокам слои остаются в положении **крутого падения**. Сложные ледники, образованные в результате слияния двух или нескольких составляющих, имеют несколько отдельных систем слоев и морен, каждая из которых соответствует своему притоку.



Сложный ледник в Гренландии



Царапины от камней перемещаемых ледником. Алтай. Фото Александр Бабкин



Ледниковый «гриб». Северный Тянь-Шань. Фото Александр Бабкин

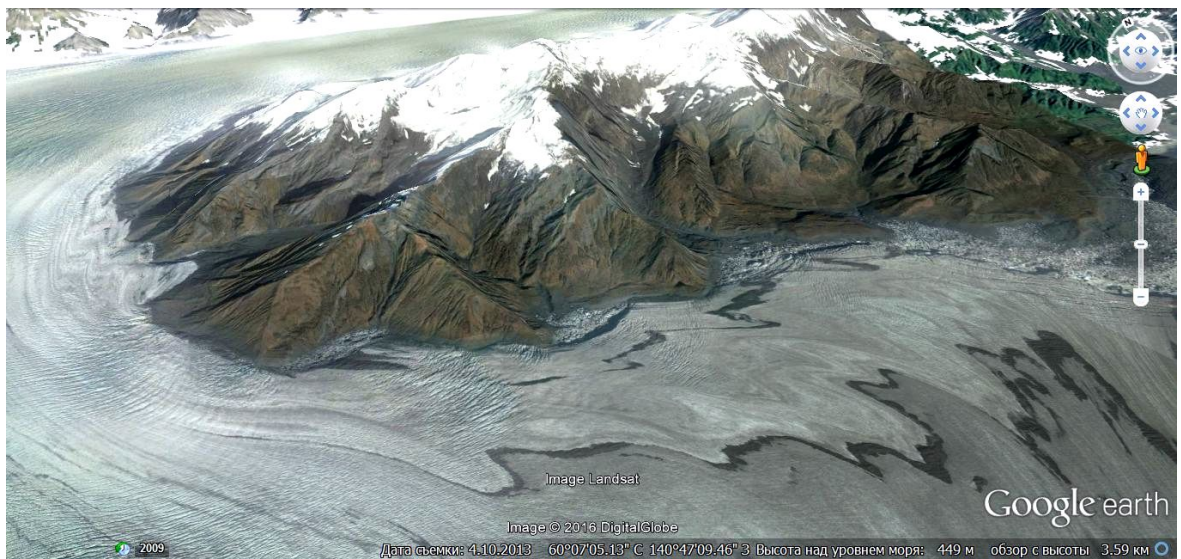
При длительном снижении среднегодовых температур горные льды по мере своего накопления начинают заполнять все ущелья и выползать на прилегающие равнины. Дальнейшее оледенение с почти полным покрытием гор и сплошным региональным распространением называется покровным оледенением.



Северный Тянь-Шань. Фото Григорий Беденко



Ледник Маласпина при выходе из гор на равнину. Аляска. photoshelter.com



Сложное движение ледника Маласпина демонстрируется рисунком ледника.



Внутри ледника. Аляска pixforweb.com



Ледник поросший лесом. Аляска. ФотоТом Веан



Когда встречается ледник с лесом. Аляска. Фото S. Hess

Покровные ледники

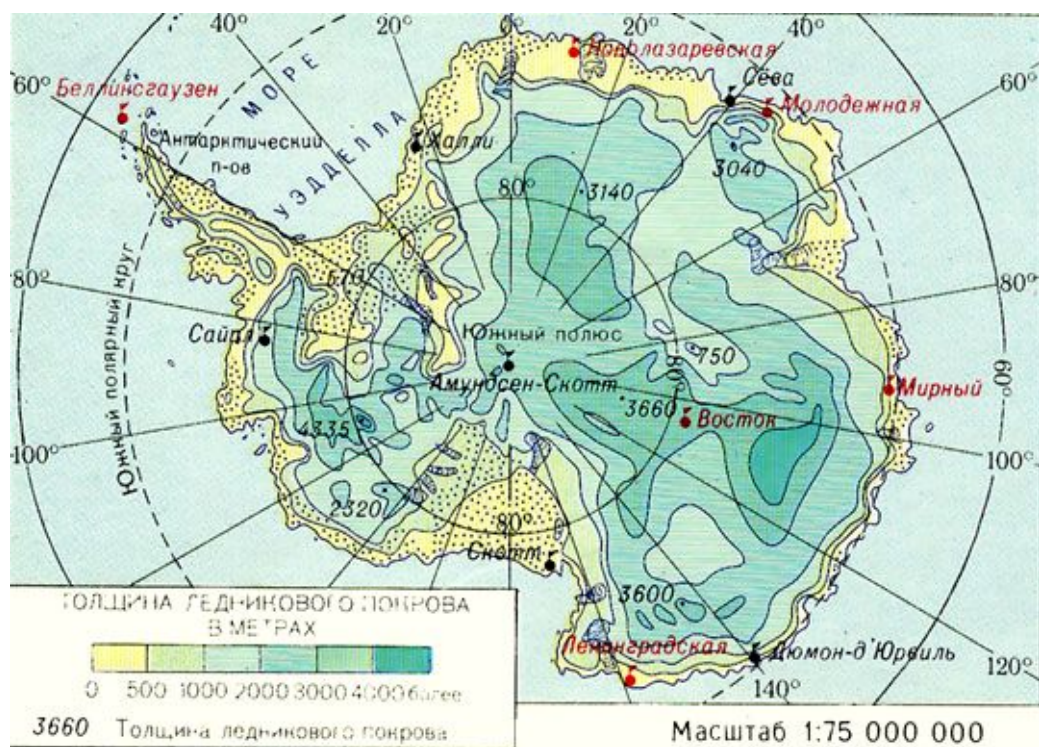
85% общей площади современных ледниковых покровов (14,4 млн. кв.км) приходится на наземный покров Антарктиды, 12,1% составляет покров Гренландии и 2,6% остаются на ледниковые покровы Канадского архипелага, Исландии, Шпицбергена, Новой Земли, Северной Земли и других островов Арктического океана.

Покровными ледниками или ледниковыми щитами называют обширные ледяные поля площадью более 1000 кв. км, где льды смещаются в радиальном направлении, то есть во все или почти все стороны от срединной части ледника и областью питания которым служит вся или почти вся площадь ледового покрова. Ледниковые покровы имеют плоско-выпуклый вид.

Рельеф ледникового покрова слабо зависит от рельефа местности, которую он покрывает. Поверхности самых крупных щитов – Антарктического и Гренландского накрывая скальный рельеф толщей льда мощностью более километра, выглядят сглаженной почти ровной пустыней, несмотря на погребенные подо льдами горы высотой в несколько километров от подножия. Однако высочайшие вершины Трансантарктического хребта высотой более 4 км и высочайшие горы Антарктиды – массив Уинсон свыше 5км над уровнем океана все-таки возвышаются своими скальными вершинами над ледовой поверхностью Антарктиды.

Антарктический ледниковый щит покрывает около 98 % площади Антарктиды и является самым крупным скоплением льда на Земле. Его площадь составляет 14 млн квадратных километров, объём — 30 млн кубических километров льда. В Антарктическом щите содержится около 61% всей пресной воды на Земле, что эквивалентно 70м уровня Мирового океана. Оледенение Антарктиды началось около 45 млн лет назад. Около 20 000 лет назад во времена последнего ледникового периода Антарктический ледяной покров занимал южную часть Южной Америки, сковывая льдами Южные Анды, достигающие высоты 4 километров.

В Восточной Антарктиде фундамент ледяного щита находится выше уровня океана, а в Западной Антарктиде фундамент погружается более чем на 2,5 км глубже уровня океана. Самые мощные толщи льда (до 4335 метров) заполняют равнину Бэрда в Западной Антарктиде лежащую целиком ниже уровня океана. В Восточной Антарктиде максимальная мощность льда достигает 3660 метров.



Толщина ледникового покрова Антарктиды

Антарктический покров имеет два типа оледенения – континентальный и шельфовый. Шельфовое оледенение представляет собой ледниковые поля, сползающие с материка на прилегающее к Антарктиде морское дно и частично залегающие непосредственно на дне или находящиеся в плавучем состоянии, так, что между шельфовым ледником и дном образуется зазор воды глубиной до 100 метров. Площадь шельфового ледника Росса крупнейшего в Антарктиде составляет 472 960 кв.км. Толщина льда у тыловых границ шельфовых ледников достигает до 1300 м, у шельфовых барьеров редко превышает 150-200 м. Морские приливы и отливы откалывают фрагменты шельфовых ледников, в результате чего образуются айсберги. В водах Антарктиды встречались ледовые поля длиной более 300 км и шириной около 100 км.



Шельфовый уступ. Антарктида. churchmilitant.com



Айсберг. Антарктика. nat geo

Движение льда в ледяном щите Антарктиды направлено от нескольких центров к периферии и скорость их перемещения разная – в пределах от 3см до 35см в сутки. При большой мощности и давлении льды способны течь против уклона поверхности ложа и преодолевать возвышенности. В центральных районах континента скорость движения

льдов ниже, чем у краев материка. По некоторым расчетам в центральных районах Антарктиды передвижение льда на 50 км происходит более чем за 1 миллион лет.

Большая часть донных льдов Антарктиды, как и остальных покровных ледников, приморожена к скальному основанию, поэтому не участвует в перемещении. Вышележащие пласты льда движутся в сторону океана. В районе Южного полюса, где толщина льда порядка 2500 м, возраст придонных слоев льда около 250 тысяч лет, а на глубине 200 м от дневной поверхности около 2 тысяч 100 лет – то есть нижние горизонты льда значительно отстают от движения верхней части антарктического ледника. Таким образом, **льды Антарктиды в большей степени консервируют подледный рельеф, чем эродируют его.** **Донное таяние льдов** имеет место и в Антарктиде. Это явление объясняется действием геотермического потока тепла из недр, в сочетании с низкой теплопроводностью льда. Некоторую роль в разогреве льда играет и сила трения. Донное таяние в Антарктиде обеспечивает водную смазку на ледниковом ложе и, следовательно, облегчает движение ледовых масс.

В Антарктиде существуют **выводные ледники**, по которым в море спускается значительная часть льдов со скоростью до 3,5 м в сутки. По достижении водной поверхности ледниковый лед откалывается с образованием айсбергов, и продолжает дрейфовать в море до полного таяния. Крупнейшим выводным ледником Антарктиды является ледник Ламберта. Через него за год проходит около 35 куб. км льда. Движение и форма выводных ледников аналогичны горным ледникам, но выводные ледники движутся посреди покровных льдов по понижениям в рельефе фундамента до границы с морем. Роль выводных ледников выполняют и шельфовые ледники, заполняющие крупные материковые заливы.



Выводной ледник покровного оледенения на Новой Земле. Четко виден фронтальный вал обломочного материала, перемещенный ледником. Фото Иван Шурф



Река на гренландском ледниковом щите. wowpics.in

Гренландский покровный ледник занимает 80% площади острова Гренландия площадью 2 млн. кв.км. Центральная часть гренландского ледникового плато находится на высотах около 3000м. Максимальная мощность ледникового покрова Гренландии по сейсмическим данным около 3400м, средняя – около 1500м.

В Гренландии широко развиты выводные ледники, которые в большей степени являются сложными горными ледниками. У некоторых выводных ледников языки выходят в море до 40км и являются плавучими. От краевых частей выводных ледников, достигающих моря, периодически откалываются айсберги, высота которых над водой достигает 80м и более.

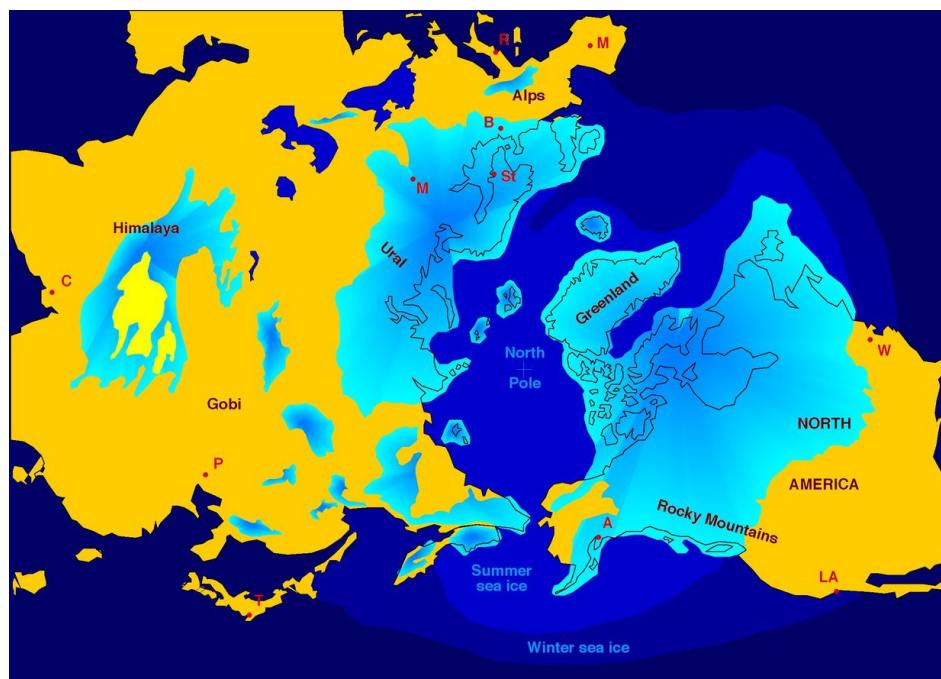
Скорости движения льдов в ледниковом щите Гренландии составляют 7-8 см за сутки, а в выводных ледниках повышаются до 27м в сутки, иногда и выше. Самые большие скорости измерены в концевых частях выводных ледников Гренландии — до 10км в год.



Гренландия. Фото Gabem Peterson

Последняя ледниковая эпоха на Земле завершилась 12000 лет назад. Тогда **Арктическое полярное оледенение** покрывало весь Северный океан с прилегающими к океану материковыми территориями. В Евразии льды доходили почти до Азовского залива Черного моря, а в Северной Америке ледник проник до современного штата Теннесси до 35 градуса северной широты.

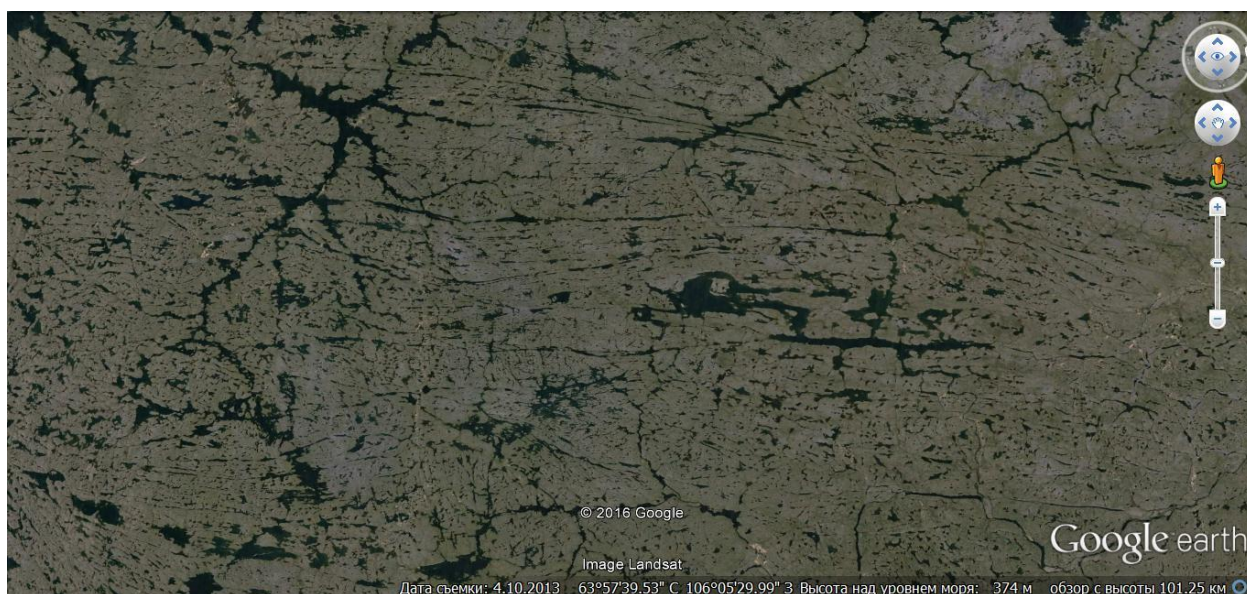
Древние покровные льды принимали значительное участие в эрозии горных пород, но опосредовано. То есть **в разрушении и транспортировке горных пород главная роль принадлежала водным потокам таявших ледников**, однако ледники, возможно, перемещали не меньшее количество обломочного материала на своей поверхности и внутри своего тела. По всему северу Европы встречаются многотонные глыбы пород-отторженцев, перемещенные льдами на сотни километров.

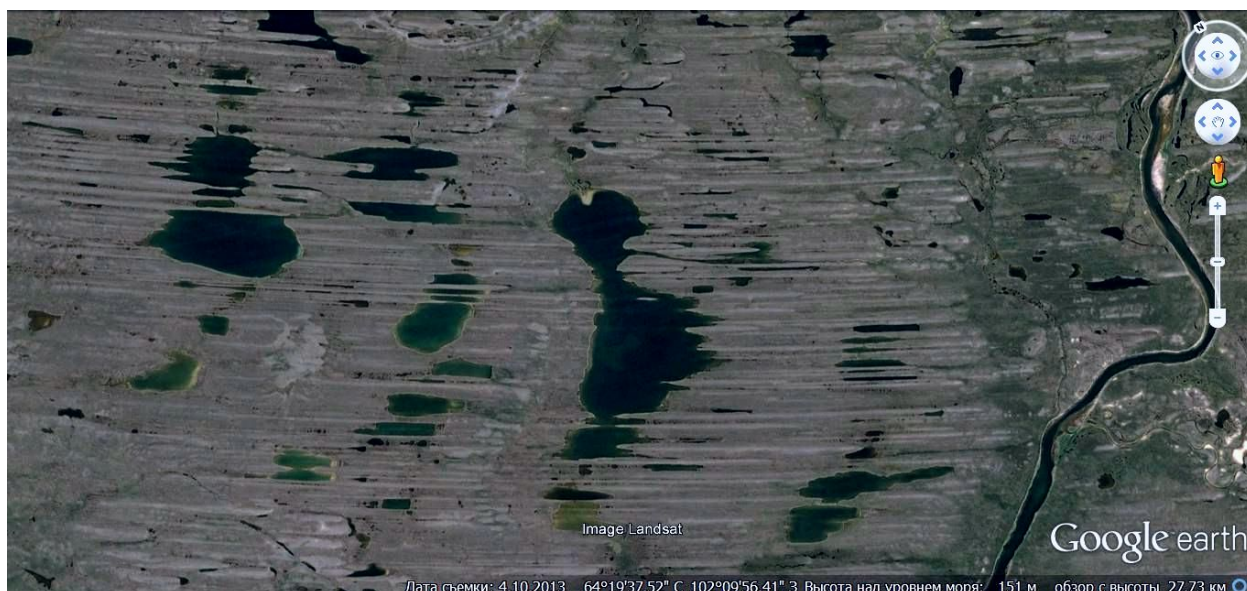


Распространение Арктического ледникового покрова в максимальную фазу последней ледниковой эпохи

Главным центром древнего оледенения Европы была Скандинавия, где толщина ледникового покрова оценивается в 2,5-3 км; второстепенными центрами были Новая Земля и Северный Урал. Основными центрами древнего оледенения Северной Америки являлись Гренландия, полуостров Лабрадор и северная часть Кордильер.

После исчезновения Арктического ледникового щита земная литосфера, ранее покрытая ледниками, испытывает до настоящего времени **гляциоизостатическое поднятие**. Литосфера без нагрузки льдов начинает всплывать в полужидкой астеносфере. Так, Канада и Скандинавский полуостров поднимаются со скоростью до 11 мм в год.





Борозды, оставленные скальными блоками при их волочении ледниками ледниковой эпохи. Северная Канада

Морские и озерные льды

При температуре +4 градуса С вода имеет максимальную плотность и это предотвращает погружение на дно водоемов приповерхностных вод остывших ниже +4 градусов. В результате на поверхности скапливается менее плотная жидкая вода, имеющая температуру от +3 до 0 град. С. При минусовой температуре этот слой замерзает, образуя ледовое покрытие на поверхности водоемов, чему способствует блокировка конвективного перемешивания воды. То есть – охлаждающийся ниже +4 град. поверхностный слой уже не способен погружаться в толщу воды, а более плотная и теплая вода с температурой около +4 град., которая скопилась ниже, не способна подниматься и смешиваться с поверхностным слоем. Ледяная кора, ввиду своих хороших теплоизоляционных свойств, в еще большей степени предохраняет от замерзания жидкую воду и только при очень низких температурах неглубокие водоемы на поверхности Земли способны отвердеть до дна.

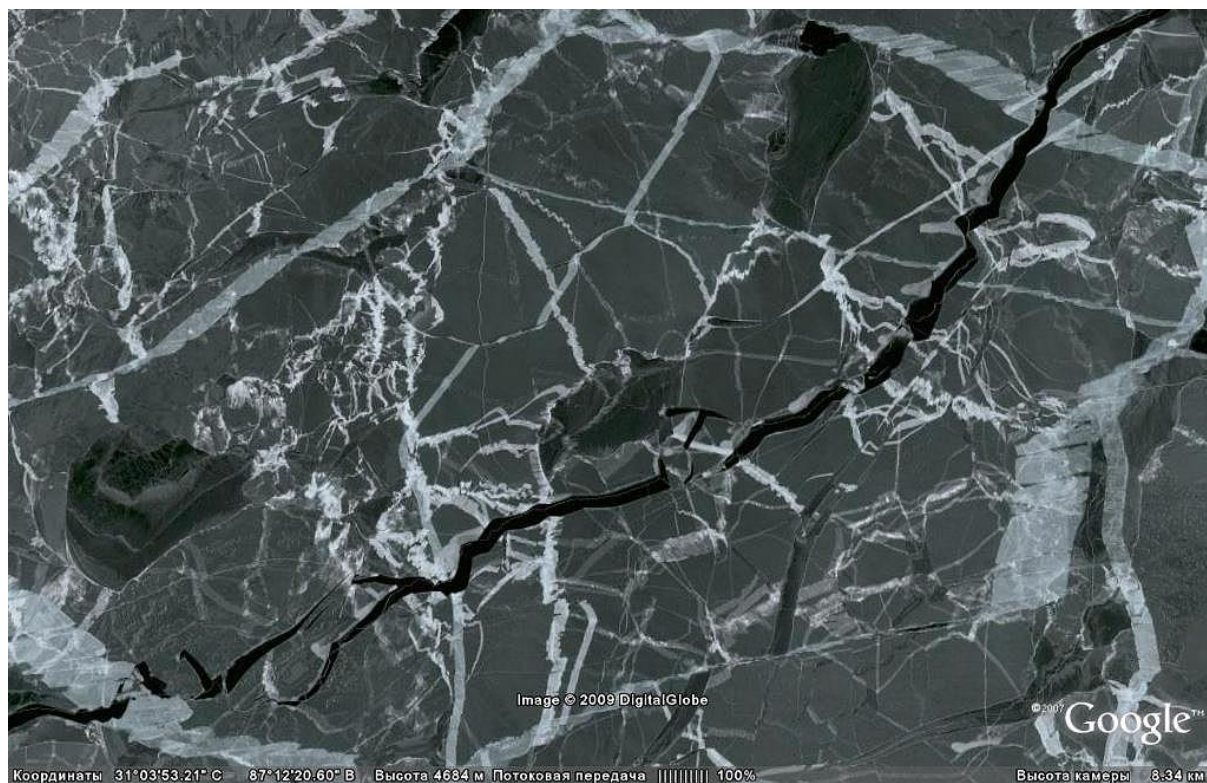
Лед морей и крупных и средних озер подразделяется на подвижный дрейфующий лед и неподвижный – припай. Припай образуется вдоль побережья, между островами и севшими на мель айсбергами. Припай может простираться в направлении открытого моря на несколько сот километров. Старые многолетние морские льды могут иметь мощность до 6 метров.

Процессы деформирования и разрушения ледяного покрова разделяют на термические и динамические. Термическое расширение и сжатие происходит неравномерно из-за

различной толщины льда и фирна, поэтому термические напряжения образуют систему трещин самых разных направлений и размеров.



Летнее оледенение Северного океана





Тектоника льдов на озерах в Тибете

Динамические напряжения, вызванные течениями, образуют более однотипные трещины. Изгибные напряжения, вызванные поверхностной волной, образуют во многих случаях параллельные трещины на расстоянии половины длины волны. *При медленном сжатии тонкого слоя льда, ограниченного толстыми льдами, образуется волнистая поверхность.*

Торошение льдов сопровождается многими формами разрушения ледового поля. При высокой скорости дрейфа льдов образуются гряды торосов сдвигового происхождения. При сжатии тонких льдин образуются торосы напоздания. Вес льда в этом случае не уравнивается силами плавучести, а формирует изгибы, сопровождаемые срезами в виде уступов.

Площади деформирования и разрушения льда достигают десятков километров.

Взаимодействие дрейфующего ледяного поля с неподвижным объектом (берегом, дном и т.д.) сопровождается различными видами разрушения льда: поперечным изгибом, дроблением (смятием) и сдвигом по трещинам. При сжатии ледового поля происходят резкие длительностью 1-5 секунд скачки деформаций, вызванные сбросами напряжений при нарушении сплошности льда. Процессы сброса отмечаются на площади до 10 кв.км. На этапе первичной ползучести ледовое поле покрывается системой трещин, сопровождающейся скачками напряжений и излучением упругих волн. На этапе третичной ползучести лавинный процесс трещинообразования заканчивается разрушением.



Торосы. Арктика. academic.ru

Разрушение льдов вызывается не только внешними силами, но и внутренними, действующими в массе льда – энергия, высвобождающаяся во время сброса деформирующих напряжений, имеется во льду в виде запаса энергии упругой деформации.

При значительных внутренних напряжениях в ледовой коре, воздействие внешних сил может привести к быстрому разлому ледяного поля, либо к релаксации внутренних напряжений за счет образования трещиноватости.

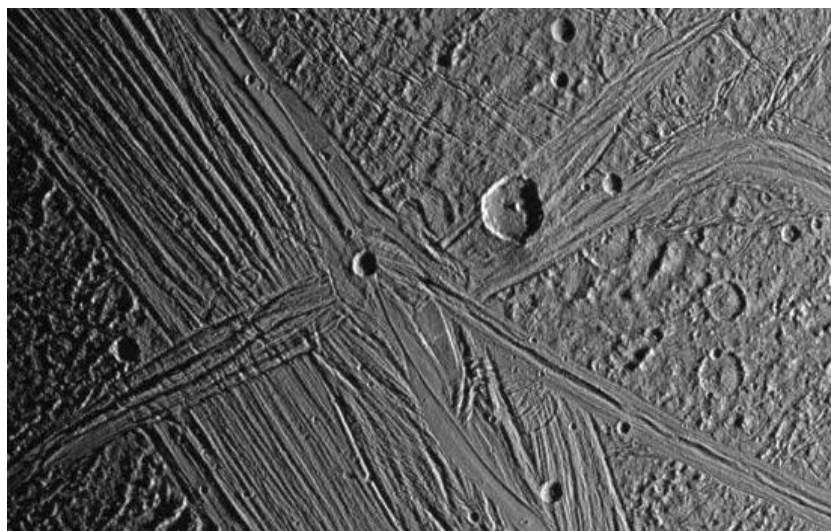
Лед на других планетах

Ганимед – крупнейший спутник Юпитера и Солнечной системы диаметром 5268 км, что на 2% больше, чем у Титана из системы Сатурна (второго по величине спутника Солнечной системы). Предполагается, что планета состоит из расплавленного железного или сульфид-железного ядра и силикатной мантии покрытой мантией водного льда мощностью 900км. В составе водной мантии предполагается существование водяного океана глубиной 200км.

Ганимед, вероятно, сформировался из аккреционной туманности вокруг Юпитера приблизительно за 10 000 лет. Такая скоростная по космическим меркам аккреция объясняется близостью спутника к Юпитеру, где туманность была весьма плотной. Аккреция, вероятно и привела к отделению силикатных горных пород от льда.



Ганимед. Фото NASA



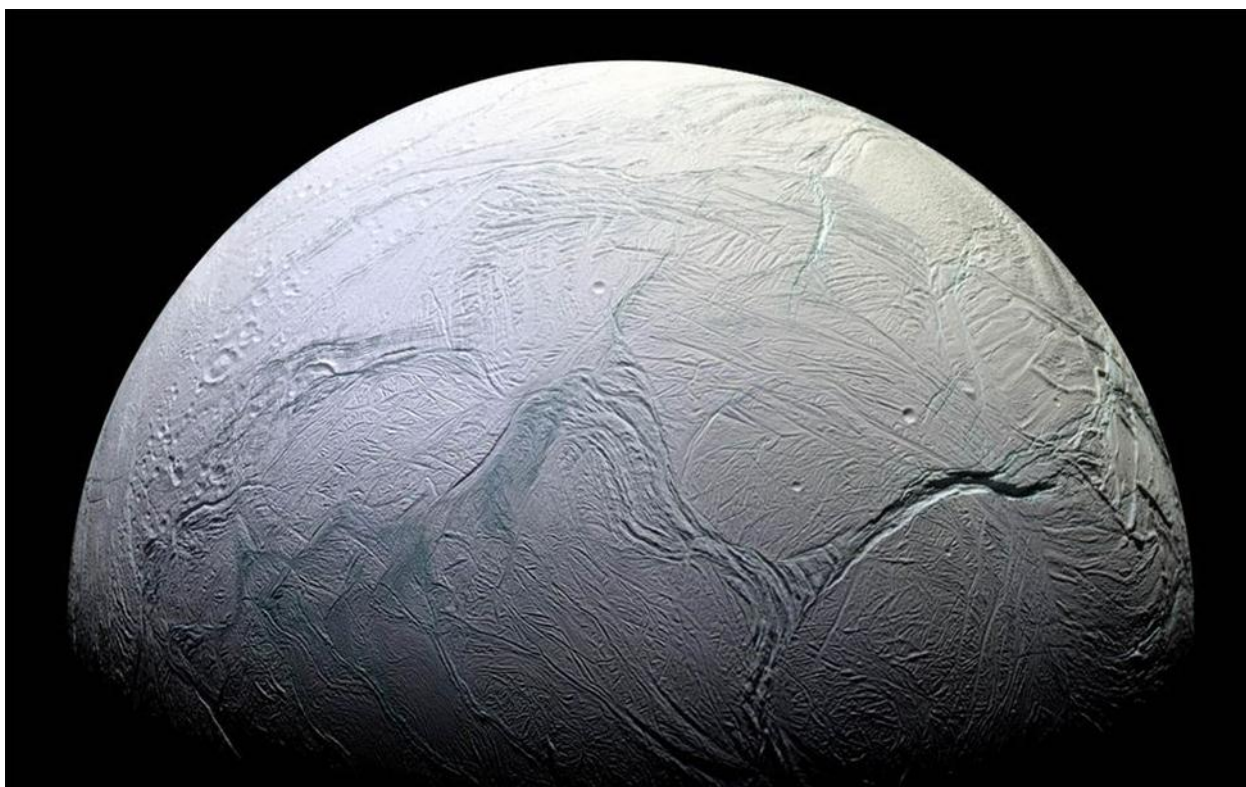
Поверхность Ганимеда. NASA

Вся поверхность Ганимеда, состоящая из водяного льда с примесью углекислого газа и диоксида серы, представлена двумя типами ландшафтов: тёмные области, занимающие треть поверхности, с большим количеством ударных кратеров, возрастом до четырёх млрд лет; и более молодые светлые области с обширными углублениями и гребнями, тектоническая активность которых вызвана периодическим нагреванием недр за счет гравитационных приливов Юпитера. Глубинные потоки разогретой воды, возможно, поднимались от ядра, вызывая тектонические деформации литосферы. В процессе тектонических изменений была стёрта старая тёмная поверхность на 70% площади спутника. Борозды на поверхности Ганимеда, вероятно, образовались в результате расширения Ганимеда на 1–6% благодаря замерзанию жидкой воды на заре существования планеты.

Спутник Юпитера **Европа** диаметром 3122 км состоит из железного ядра, силикатной мантии и ледяной коры толщиной 10-30 км, которая является самой гладкой в Солнечной системе; на ней очень мало кратеров и много трещин. Температура на поверхности – минус 150–190 градусов С. Из-за очевидной молодости и гладкости ледовой поверхности предполагается, что под ней находится водяной океан, в котором не исключается существование микроскопической жизни. Кроме того признаком существования океана являются данные о том, что ледяная кора когда-то сдвинулась на 80 градусов относительно силикатной мантии. Такое было бы возможно только при наличии жидкого слоя.

Европа содержит меньше льда, чем остальные крупные спутники Юпитера (кроме Ио), потому что она была сформирована в позднюю эпоху аккреции юпитерианского газопылевого диска, когда завершилась основная конденсация воды.

На поверхность планеты самые высокие неровности имеют высоту несколько сот метров.



Европа. NASA

Ландшафты Европы: Равнинные области, предположительно образующиеся в результате извержений воды *криовулканами* – вода заполняет огромные площади и замерзает. Криовулканы извергают воду, аммиак, соединения метана в жидком или в газообразном состоянии.

Хаотические области, занятые «обломками» разных геометрических форм.

Области с преобладанием линий и полос.

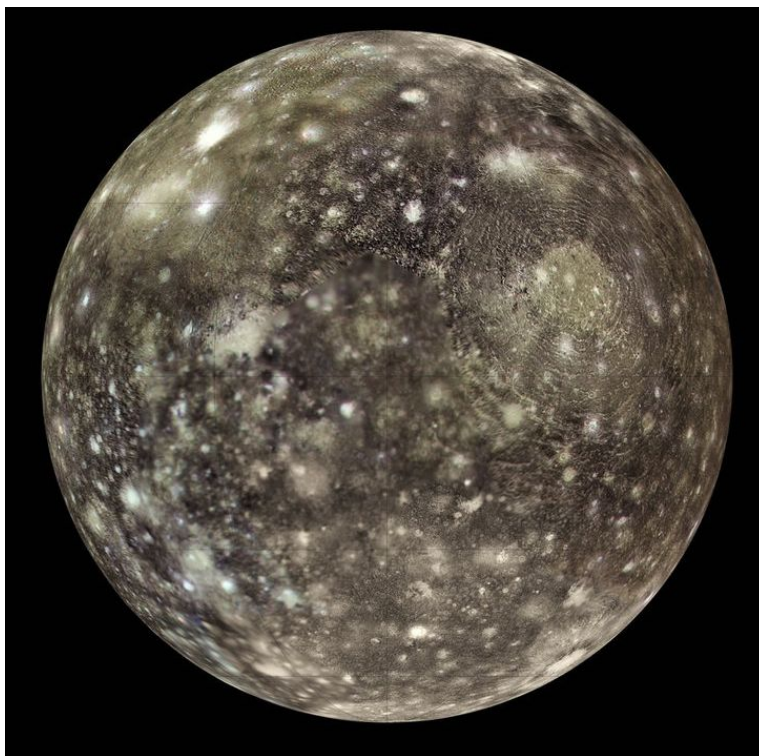
Сдвоенные гряды.

На Европе есть около 30 ударных кратеров диаметром свыше 5км и возрастом от 20 до 180 млн лет.

Кора Европы густо исполосована пересекающимися разломами. Это значит, что Европа геоактивная планета. Некоторые из них опоясывают Европу почти полностью. Ширина разломов иногда достигает более 20 км. Разломы часто осложнены тёмными размытыми краями, продольными бороздами и центральными светлыми полосами, что вероятно вызвано поднятием жидкой воды или относительно разогретого льда по разломам с последующим затвердеванием. Края некоторых разломов и трещин сдвинуты относительно друг друга.

Молодые разломы ориентированы к Юпитеру определённым образом; более древние ориентированы иначе, и чем они старше, тем это различие больше. Это можно объяснить тем, что поверхность Европы вращается быстрее недр: ледяная кора спутника отделена от недр слоем жидкой воды и потому прокручивается относительно ядра под влиянием сил притяжения Юпитера. Учёные пришли к выводу, что **полный оборот внешней ледяной коры относительно недр спутника занимает не менее 12 000 лет.**

Каллисто второй по размеру спутник Юпитера и третий по величине спутник в Солнечной системе после Ганимеда и Титана. Диаметр 4820км. Планета состоит из приблизительно равного количества камня и льдов.



Каллисто. NASA

Спектроскопия выявила на поверхности Каллисто водяной лёд, углекислый газ, сернистый газ, силикаты и органические соединения. Планета покрыта множеством кратеров, что

указывает на древний возраст поверхности. Рельеф образованный тектоническими процессами присутствует только в виде разломов. Низменности спутника сглажены и они более тёмные по сравнению с возвышенностями, покрытыми ярким инеем. Кратерирование на планете одно из самых интенсивных в Солнечной системе. Почти все кратеры наложены друг на друга. Распространение холмов на Каллисто указывает на постепенное сглаживание рельефа процессами *сублимации*. **Сублимация – переход вещества из твёрдого состояния в газообразное без пребывания в жидком состоянии.** Из-за низкой скорости роста спутника и слабого приливного нагрева температура в недрах планеты оказалась недостаточной для полномасштабной конвекции (круговорот вещества, вызванный температурной и плотностной неоднородностью вещества) и полной дифференциации недр. Отводимое в космос тепло, генерируемое столкновениями с астероидами, а также радиоактивным распадом и сжатием спутника, при медленной аккреции вещества (Каллисто сформировался предположительно за несколько миллионов лет), обусловило низкую тектоническую активность планеты.

Недра Каллисто составляют слой океана жидкой соленой воды под твердой ледяной корой на глубине 100—150 км и мощностью свыше 100 км и небольшое силикатное ядро. Существование океана становится более вероятным, если предположить наличие в нём небольшого количества аммиака или иного антифриза. В таком случае глубина океана может достигать до 300 км.

В настоящее время возможная конвекция льда в недрах Каллисто может быть многоуровневой согласно разным кристаллическим фазам льда на разных глубинах.

Титан – спутник Сатурна. Диаметр 5650 км. Температура поверхности – минус 179 град.С. Поверхность Титана, в основном состоящая из водяного льда и органических веществ, большей частью ровная, но имеются горные образования, небольшое количество кратеров и несколько криовулканов. В районе Северного полюса имеется несколько метан-этановых озёр (крупнейшее – 1000 км в длину), периодически покрывающиеся льдом, который согласно расчетам должен плавать по поверхности озёр. Метан замерзает при температуре минус 183 град.С. Однако при дальнейшем снижении температуры атмосферный азот начинает активнее растворяться в жидких углеводородах, делая их менее плотными – тогда ледяные глыбы должны тонуть. Скорее всего, озера Титана полны и плавающими айсбергами, и глыбами льда на дне.

Титан имеет твёрдое скальное ядро, диаметром около 3400 км. Мантия – смесь водяного льда и гидрата метана.



Валуны из метанового льда на поверхности Титана. NASA

На Титане действуют значительные приливные силы Сатурна, активизирующие тектонические процессы на планете – разогревают ядро и стимулируют вулканическую активность. Титан всегда повернут к Сатурну одной стороной, что возможно объясняется тем, что ледяная кора отделена от основной массы спутника глобальной жидкой прослойкой воды с примесью аммиака.

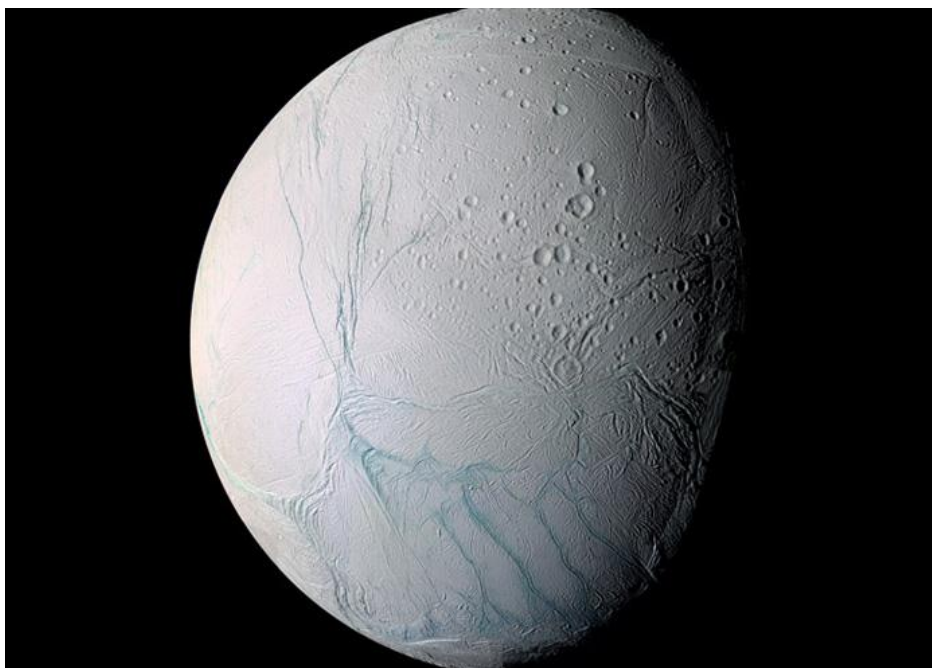
Энцелад – спутник Сатурна. Диаметр 504 км.

Энцелад состоит в основном из водяного льда и, возможно, силикатов и железа. Спутник имеет почти белую поверхность с рекордной в Солнечной системе чистотой и отражательной способностью. Он отражает почти весь падающий свет: его альбедо превышает 99 %. Поглощение света поверхностью весьма незначительное, и её средняя температура достигает только минус 198 град. С.

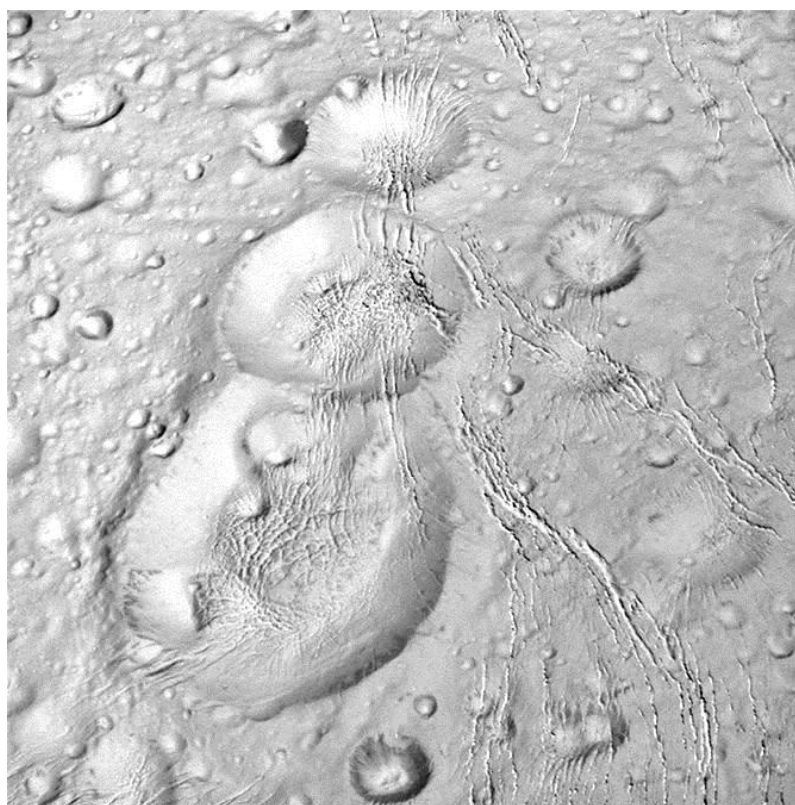
Распад некоторых элементов в недрах Энцелада мог дать достаточно тепла для расслоения недр на ледяную мантию и каменное ядро. Последующий радиоактивный и приливный нагрев могли поднять температуру ядра до 1000 град. К, что достаточно для расплавления внутренней мантии. Современную геологическую активность Энцелада обеспечивает приливной нагрев Сатурна и соседнего спутника Дионы.

Предполагается, что под южной полярной областью находится жидкое водяное море, существующее благодаря приливному воздействию орбитального резонанса Энцелада с

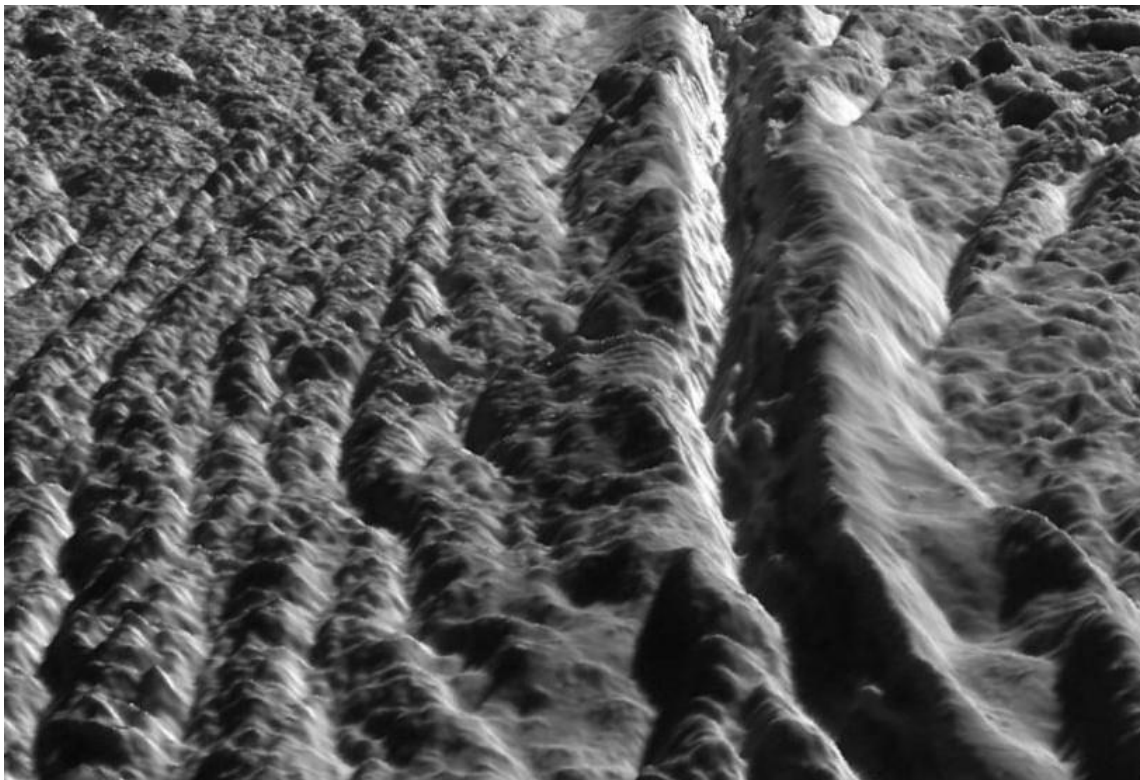
Дионой. Этот резонанс приводит к регулярному изменению величины приливных сил, что обеспечивает геологическую активность Энцелада. Оценочная площадь этого моря около 80 тысяч кв.км, толщина – около 10км, а глубины залегания – 30-40 км. Температура морской воды может составлять около +1 град. С.



Энцелад. NASA



Кратеры на Энцеладе, рассеченные разломами. NASA



Разломы на Энцеладе. NASA

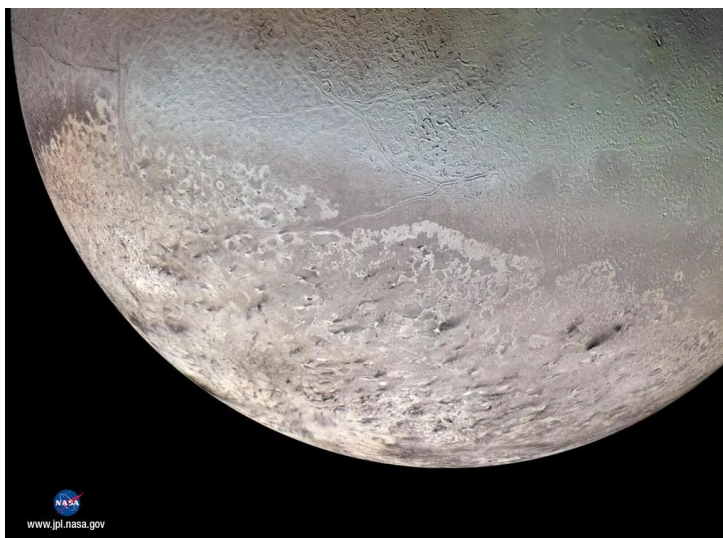
В этом же полярном районе функционируют водяные гейзеры, которые выбрасывают снег на высоту 250 км и формируют кольцо Е Сатурна. Вода гейзерных выбросов, вероятно, поступает из подповерхностного океана.

На спутнике есть пять типов ландшафта: *участки с кратерами, гладкие области, ребристые участки, длинные (до 200км) и широкие (до 10км) разломы, достигающие глубины 1км, и уступы.* Разнообразие ландшафтов, гладкие участки и разломы с уступами не перекрытые кратерами свидетельствуют о постоянных тектонических изменениях на поверхности Энцелада. Гладкие районы отделены от кратерированных ребристыми структурами – бороздами и гребнями, которые идут параллельно друг другу и стыкуются под углом. Выравнивание гладких участков происходит под действием гравитации в течение длительного времени при отсутствии активных тектонических процессов. По количеству кратеров возраст некоторых участков планеты оценивается в 500 000 лет.

Последние исследования допускают на Энцеладе наличие глобального океана. Если бы Энцелад был полностью твердым телом, колебания (либрации) орбиты спутника были бы не столь значительными.

Тритон – спутник Нептуна имеет массивное каменно-металлическое ядро, окружённое ледяной водной мантией, с коркой водяного льда и слоем азотного льда на поверхности. Содержание водяного льда в составе Тритона оценивается от 15 до 35 %. Диаметр планеты 2707км, что немного меньше диаметра Луны.

Тритон – геологически активный спутник со сложной геологической историей и сложным рельефом. На спутнике действуют гейзеры извергающие шлейфы замерзшего азота. Азот, пробиваясь сквозь лед, выносит частицы на высоту до 8 км, откуда они распространяются шлейфами на расстояния до 150 км в западном направлении, что говорит о существовании преобладающего ветра. Механизм действия гейзеров пока непонятен, но гейзеры функционируют в широтах, где Солнце находится в зените.



Тритон. NASA

На Тритоне азотные льды покрывают около 55 % поверхности, 20-35 % приходится на водяной лёд и 10-25 % на замерзший углекислый газ. Средняя температура поверхности минус 235 град. С.

Приливное воздействие Нептуна расплавляло недра спутника. По мере замерзания и расширения льда, поверхность Тритона покрывалась разломами.

В экваториальной зоне на обращённой к Нептуну стороне имеются образования, напоминающие замёрзшее озеро с террасами на берегах с высотой ступеней до километра. Такая структура, вероятно, возникла в результате последовательных эпох замерзания и плавления. В основе террас, возможно, лежит водяной лёд.

Южная полярная шапка состоит из розового, жёлтого и белого азотного льда с включениями метана и монооксида углерода (угарный газ). Розово-жёлтая окраска образуется благодаря воздействию на метан ультрафиолетового излучения Солнца.

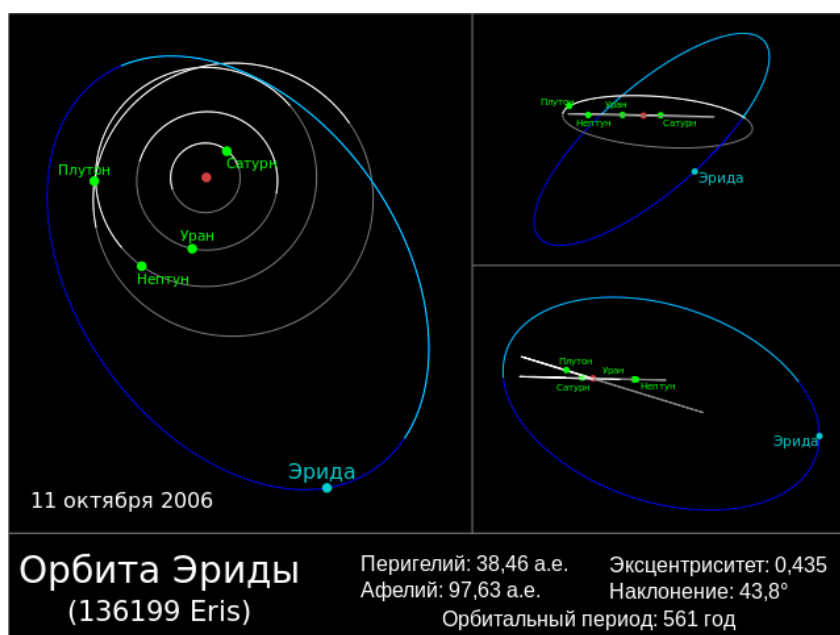


Нептун с Тритона. staticflickr.com

На поверхности Тритона мало ударных кратеров, что свидетельствует о геологической активности спутника, но обнаружено множество огромных кратеров, имеющих происхождение, связанное с внутренней эндогенной деятельностью.

В западном полушарии Тритона расположена уникальная местность с рельефом, напоминающим дынную корку. Местность дынной корки считается древнейшей на спутнике. Самая распространённая версия происхождения «дынной корки» связывает её происхождение с затоплением впадин после мощной криовулканической активности опустошающим подледные камеры, откуда поступал извергающийся материал. После затвердевания лёд расширился и трескался.

В Солнечной системе есть множество других ледяных планет меньших размеров. **Самые значительные скопления ледяных объектов находятся в поясе Койпера, где вращаются Плутон (диаметр 2372км), недавно открытая Эрида (диаметр 2330км) и множество других небольших планетоподобных тел.**



Самые большие запасы льда среди планет Солнечной системы, вероятно, имеет Юпитер, где один из внутренних слоев планеты, как предполагается, состоит из водяного льда.

Возможно, один из слоев Сатурна состоит из смеси водяного и аммиачного льда. В составе других газовых гигантов – Урана и Нептуна наличие льдов не предполагается.

Александр Бабкин 2016 год