

FROZEN ROCK EVOLUTION IN THE EARTH HISTORY

E. D. ERSHOV

This paper deals with the evolution of the Earth permafrost zone and reconstruction of glacial and geocryological environments occurring on the Earth in the Pre-Cenozoic era using the actualism principle. Holocene and Pleistocene glacial sheets are briefly characterized. Their parameters and its effect on the temperature regime of the underlying rocks have being discussed.

Статья посвящена вопросам эволюции криолитозоны Земли и реконструкции ледниковых и геокриологических обстановок Земли в докайнозойское время. Кратко охарактеризованы современные и плейстоценовые ледниковые покровы, показаны взаимосвязи между отдельными параметрами и влияние их на температурный режим подстилающих горных пород.

ЭВОЛЮЦИЯ МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Э. Д. ЕРШОВ

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время получено еще мало данных, которые подтверждают распространение на нашей планете в древние эпохи толщ мерзлых пород. Доказательством служат в основном обнаружение древних материковых оледенений по моренным их отложениям и установление явлений механического отрыва пород ложа ледника, переноса и обработки обломочного материала и отложения его после таяния льда. Уплотненные и сцементированные древние морены, плотность которых близка к породам типа песчаников, названы тиллитами. Обнаружение таких образований разного возраста в различных районах земного шара однозначно указывает на неоднократное возникновение, существование и исчезновение ледниковых покровов, а следовательно, и мерзлых толщ. Развитие ледниковых покровов и мерзлых толщ может происходить асинхронно, т.е. максимальное развитие по площади оледенений и криолитозоны может не совпадать по фазе. Однако в любом случае при этом наличие крупных ледниковых покровов свидетельствует о существовании и развитии мерзлых толщ, которые по площади должны занимать значительно большие территории, чем сами ледниковые покровы.

По Н.М. Чумакову, а также В.Б. Харланду и М.Дж. Хэмбри, интервалы времени, в течение которых формировались ледниковые отложения, именуется ледниковыми эрами (длительностью первые сотни миллионов лет), ледниковыми периодами (миллионы — первые десятки миллионов лет), ледниковыми эпохами (первые миллионы лет) [1, 2]. В истории Земли можно выделить следующие ледниковые эры: раннепротерозойскую (2500 — 2000 млн. лет назад), позднепротерозойскую (900 — 630 млн. лет назад), палеозойскую (460 — 230 млн. лет назад) и кайнозойскую (30 млн. лет назад — настоящее время). Остановимся сначала на рассмотрении кайнозойской эры, для которой уже накоплен достаточно обширный материал, позволяющий хотя бы в первом приближении осветить соотношения распространения мерзлых толщ и ледниковых покровов.

КАЙНОЗОЙСКАЯ ЛЕДНИКОВАЯ ЭРА

Кайнозойская ледниковая эра (30 млн. лет назад — настоящее время) по геологическим масштабам только началась. В современное время покровные ледники существуют в высоких широтах северного и южного полушарий. В северном полушарии

покровное оледенение на юг простирается до 60°с.ш. (Гренландия), современный морской ледовый покров — до 43° — 46°с.ш., криолитозона — примерно до 47° — 52°с.ш. Альпийская мерзлота в Тибете встречается на 27° — 40°с.ш. Исследованиями в Антарктиде и Гренландии установлено, что толщина ледника может быть выражена как функция длины профиля или площади покрова. Эти простые зависимости использованы нами для приблизительной оценки мощности древних ледниковых покровов. Горные породы ложа ледника могут находиться в мерзлом или талом состоянии в зависимости от температурных условий на поверхности ледника и его мощности. По оценкам И.Л. Зотикова, во всей центральной области Антарктиды критическая толщина ледника (при которой температура у нижней поверхности ледника равна температуре плавления льда) меньше истинной толщины и идет непрерывное таяние льда у ложа [3]. Ближе к краю ледника в области шириной около 250 — 300 км критическая толщина ледника уже превышает истинную, скальное ложе под ледником проморожено, вероятно, на глубину до 500 м. У берега в поясе шириной около 50 — 100 км снова происходит таяние у нижней поверхности, теперь уже в основном за счет тепла, выделяемого при движении ледника.

В кайнозойскую эру наиболее изучена ледниковая история плейстоцена (~2.0 млн. лет назад). Максимальное развитие оледенения и климатический минимум плейстоцена не совпадали по времени. Максимум похолодания наступил тогда, когда ледниковый покров уже находился в стадии деградации. Общее направленное понижение температуры достигло в конце плейстоцена такой степени, что обусловило начало обширного оледенения Северного Ледовитого океана, затем севера Атлантического и Тихого океанов. Граница льдов проходила на 1500 — 1700 км южнее современной [4]. Южная граница распространения криолитозоны и морских льдов в конце плейстоцена в северном полушарии имела ярко выраженное широтное направление и проходила примерно по 40°с.ш. с отклонениями до 33° — 35°с.ш. (в океане). Протяженность криогенной области вдоль меридиана была около 9 — 10 тыс. км. В Южном полушарии максимальная граница распространения грубообломочного материала, принесенного айсбергами и морскими льдами, достигала 40°с.ш.. Итак, в конце плейстоцена в северном и южном полушариях Земли сформировались симметричные криогенные “шапки” (или гляцио-криогенные массивы), по А.А. Величко [4], с центрами у Южного и Северного полюсов. Они слагались из обширных пространств морских льдов, областей покровных оледенений и мерзлых пород на материках (рис. 1). При этом континентальные ледниковые покровы начинают формироваться в приокеанической части континента. В центральной части крупных континентов, где количество осадков сокращается, происходит многолетнее промерзание горных пород. По периферии ледниковых покровов образуется перигляциальная зона. Таким образом, в высоких и умеренных широтах континентов

формируется криолитозона, ширина которой увеличивается от окраины в глубь континента, ориентировочно от 500 до 3000 км. Эти числа могут быть использованы при построении палеореконструкций. При этом можно считать, что в ледниковые периоды область многолетнемерзлых пород (за пределами ледников) занимает от 30 до 50% площади криогенной шапки. Толщина ледниковых покровов в кайнозойский период достигала нескольких километров (до 4 км и более). Близкую толщину имели и покровы в древние периоды.

В целом для кайнозойского периода отмечено, что граница ледниковых и многолетнемерзлых массивов имеет четко выраженное широтное положение. Ширина перигляциальной зоны (области влияния ледника на прилегающие участки суши) от одного оледенения к другому могла варьировать, но в целом протяженность по меридиану суммарной области, занятой ледниковыми покровами и многолетней мерзлотой, примерно постоянная. При восстановлении геокриологических обстановок прошлого, учитывая палеогеографические реконструкции [5], однозначно принималось, что в зоне полярного климата за пределами ледниковых покровов определенно формировались мерзлые породы. Дополнительным доказательством наличия мерзлых пород служат перигляциальный генезис отложений и ископаемые посткриогенные образования.

Соотношения распространения покровных оледенений и мерзлых пород в кайнозойскую эру легли в основу восстановления геокриологических условий более древних ледниковых периодов. Палеоконтинентальные реконструкции древних периодов (рис. 2 — 4) представлены в циркумполярной проекции.

ПОЗДНЕПРОТЕРОЗОЙСКАЯ ЛЕДНИКОВАЯ ЭРА (900 — 630 МЛН. ЛЕТ НАЗАД)

Широко распространенным в разрезе пород верхнего протерозоя является так называемый лапландский ледниковый горизонт (670 — 630 млн. лет назад), который обнаружен в Европе, Азии, Западной Африке, Гренландии, Австралии. В Европе лапландский горизонт изучен в древних впадинах Восточно-Европейской платформы и краевых частях складчатой зоны Западной Европы и Скандинавии, а также на Урале. Северо-западная граница лапландских ледников проходила в Центральной Швеции. В Казахстане, Средней Азии, Китае прослеживаются два ледниковых горизонта. Первый соответствует лапландскому горизонту Европы. В Западной Африке материковый ледниковый покров (площадью не менее 2000 × 3000 км) располагался в пределах Леоно-Либерийского массива. В Австралии ледники покрывали только внутренние горно-складчатые территории.

До недавнего времени существовавшие мобилистские модели расположения материков не могли объяснить распространение ледниковых щитов, так как все континенты находились по этим построениям в приэкваториальной зоне. В.Е. Хаин и

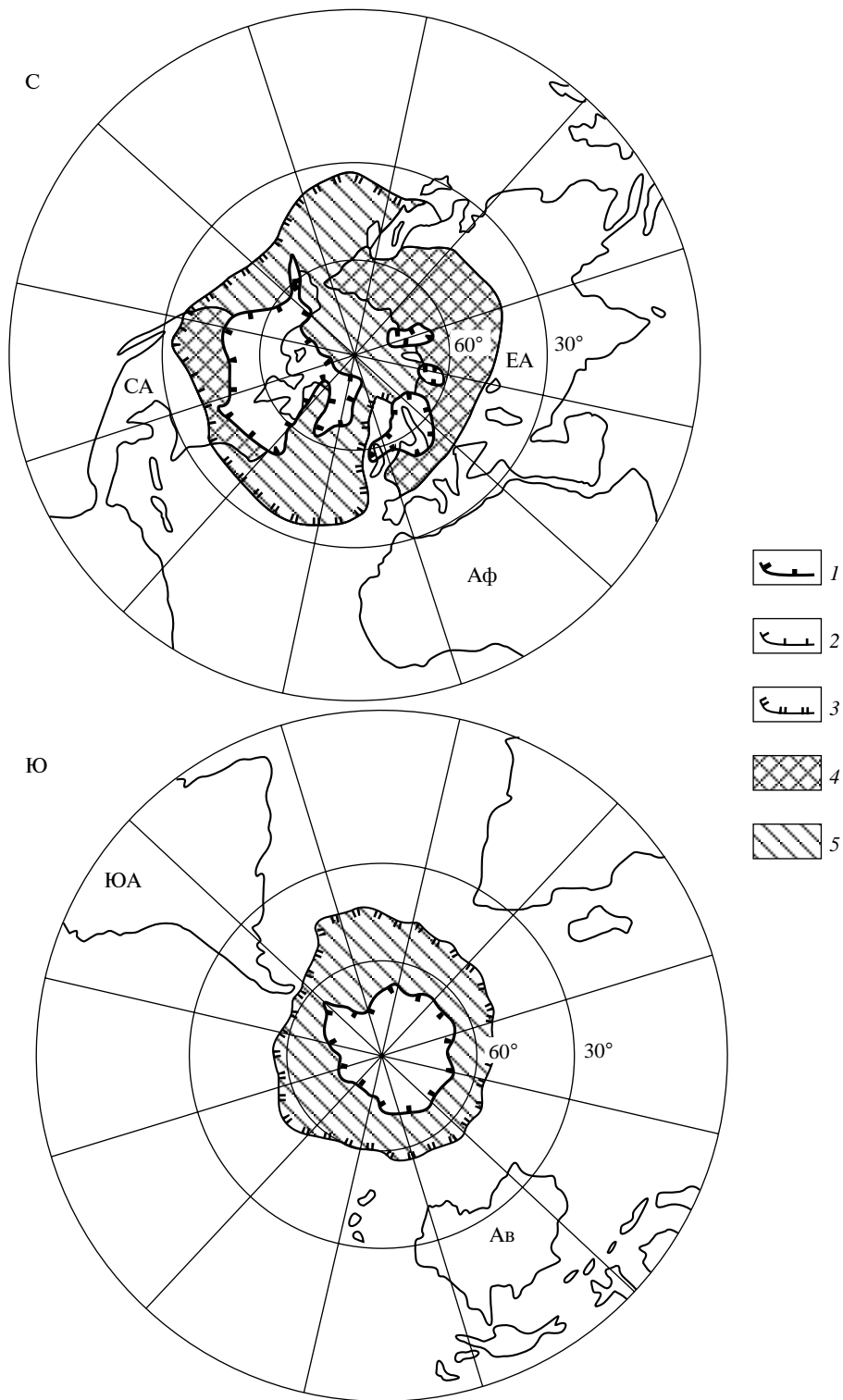


Рис. 1. Распространение ледниковых покровов, морских льдов и многолетней мерзлоты в верхнем плейстоцене. Составлено по А.А. Величко (1973).

Границы: 1 – ледниковых покровов, 2 – многолетней мерзлоты, 3 – морских льдов; области распространения: 4 – многолетней мерзлоты (за пределами ледниковых покровов), 5 – морских льдов. Современные континенты и их части: Ав – Австралия, Аф – Африка, СА – Северная Америка, ЮА – Южная Америка, ЕА – Евразия, Ан – Антарктида, Сб – Сибирь, ВЕ – Восточная Европа, К – Китай.

Н.А. Ясаманов предложили палеоконтинентальную реконструкцию, по которой области развития тиллитов на континентах располагались только в высоких широтах (до 60°): основная масса – в южном полушарии, а тиллиты Тянь-Шаня и Австралии – в северном (рис. 2). Принимая за исходную данную реконструкцию, можно сделать предположительные выводы о том, что ледниковые щиты в Восточной Европе и Западной Африке сравнимы между собой: их вероятные минимальные размеры достигали 4 – 7 млн. км², центры оледенения находились на окраине континентов примерно на 65-й параллели. При такой площади средняя толщина ледниковых покровов могла быть 2 – 2,5 км.

Представляется вполне вероятным, учитывая положение древних моренных отложений (тиллитов) в Гренландии, Шотландии и Нормандии (примерно 60° ю.ш.), что Европейский и Африканский ледниковые покровы временами сливались и в высоких широтах (южнее 60 – 65° ю.ш.) существовал единый ледниковый щит. Такое гипотетическое максимально возможное распространение ледникового щита в южном полушарии показано на рис. 2. При любых размерах ледниковых покровов горные породы находились в мерзлом состоянии на континентах, расположенных южнее 60° ю.ш., то есть на всей Восточно-Европейской платформе и в Северо-Западной Африке. В северном полушарии многолетнемерзлые породы могли формироваться на большей части Австралии, а также в Казахстане и Тянь-Шане.

ПАЛЕОЗОЙСКАЯ ЛЕДНИКОВАЯ ЭРА (460 – 230 МЛН. ЛЕТ НАЗАД)

Эта ледниковая эра подразделяется на позднеордовикский–раннесилурийский, позднедевонский и каменноугольно-пермский ледниковые периоды.

ПОЗДНЕОРДОВИКСКИЙ–РАНЕСИЛУРИЙСКИЙ ЛЕДНИКОВЫЙ ПЕРИОД (460 – 420 МЛН. ЛЕТ НАЗАД)

Ледниковые отложения верхнего ордовика–нижнего силура распространены в Африке, Южной Америке, а также в восточной части Северной Америки и Западной Европе. Самые ранние доказательства оледенения обнаружены в отложениях Северо-Восточного Ньюфаундленда, на севере Аравийского п-ва и в Центральной Сахаре. Пиком оледенения является обширный ледниковый щит на большей части северной и западной Африки. В Южной Америке тиллиты отлагались преимущественно в морской обстановке, куда лед приходил из возвышенных областей. Лучшее всего верхнеордовикские–позднесилурийские ледниковые отложения изучены в Африке (с примыкающей к ней Аравией), где они имеют широкое распространение и наибольший возрастной диапазон.

По нашим ориентировочным расчетам, общая площадь территории, покрытой в позднем ордовике материковым оледенением (включая внутренние

морья), составляла примерно 23,6 млн. км², в раннем силуре – 13,7 млн. км² (см. рис. 3). Логично предположить, что на территории Центральной и Восточной Африки, расположенной в континентальной части Гондваны и покрытой ледниковыми покровами, существовали перигляциальные условия и формировались многолетнемерзлые породы. Промерзание началось, вероятно, в Центральной Африке в позднем ордовике (460 млн. лет назад). Позднее, в раннем силуре (420 млн. лет назад) промерзали породы Восточной Африки. Кроме того, криолитозона существовала, возможно, и на северо-западе Южной Америки. Таким образом, можно предположить, что на территории всей Африки и Южной Америки формировались гляциальные и перигляциальные условия. Граница “криогенной шапки” южного полушария в позднем ордовике–раннем силуре могла достигать 35° – 40° южной палеошироты. При толщине сахарского ледникового покрова около 3 км под его центральной частью могли существовать талые породы.

ПОЗДНЕДЕВОНСКИЙ ЛЕДНИКОВЫЙ ПЕРИОД (ОКОЛО 370 – 355 МЛН. ЛЕТ НАЗАД)

Позднедевонский ледниковый период существовал в Бразилии и, возможно, в Африке [6]. Ледниковая область протягивалась от устья Амазонки до восточного побережья Бразилии. В Африке в Северном Нигере залегают тиллиты, которые сопоставимы с бразильскими. В целом ледниковые области протягивались от границы Перу с Бразилией к северному Нигеру, диаметр района более 5000 км. Если исключить вероятное протяжение к Нигеру, то диаметр будет около 3500 км.

Южный полюс в позднем девоне, по реконструкции П. Мореля и Э. Ирвинга, находился в центре Гондваны в Центральной Африке. Ледниковые бассейны расположены на приокеанической окраине палеоконтинента в основном в высоких широтах (не севернее 65-й параллели). Судя по высокоширотному континентальному положению Африки, можно предположить возможное повсеместное развитие мерзлых пород на этом континенте и, кроме того, на северо-западе Южной Америки.

КАМЕННОУГОЛЬНО-ПЕРМСКИЙ ЛЕДНИКОВЫЙ ПЕРИОД (350 – 230 МЛН. ЛЕТ НАЗАД)

В течение карбона происходило постепенное похолодание климата, достигшее кульминации около 300 млн. лет назад. Этому способствовало сосредоточение большей части континентов в южном полушарии и образование суперконтинента Гондвана, формирование крупных горных цепей и изменение океанических течений. В карбоне–перми на большей части Гондваны существовали ледниковые и перигляциальные условия.

В Центральной Африке о наличии мощного ледникового покрова в позднем карбоне–ранней перми свидетельствуют тиллиты Замбии, Зимбабве, Восточного Конго, Танзании. Центр континентального

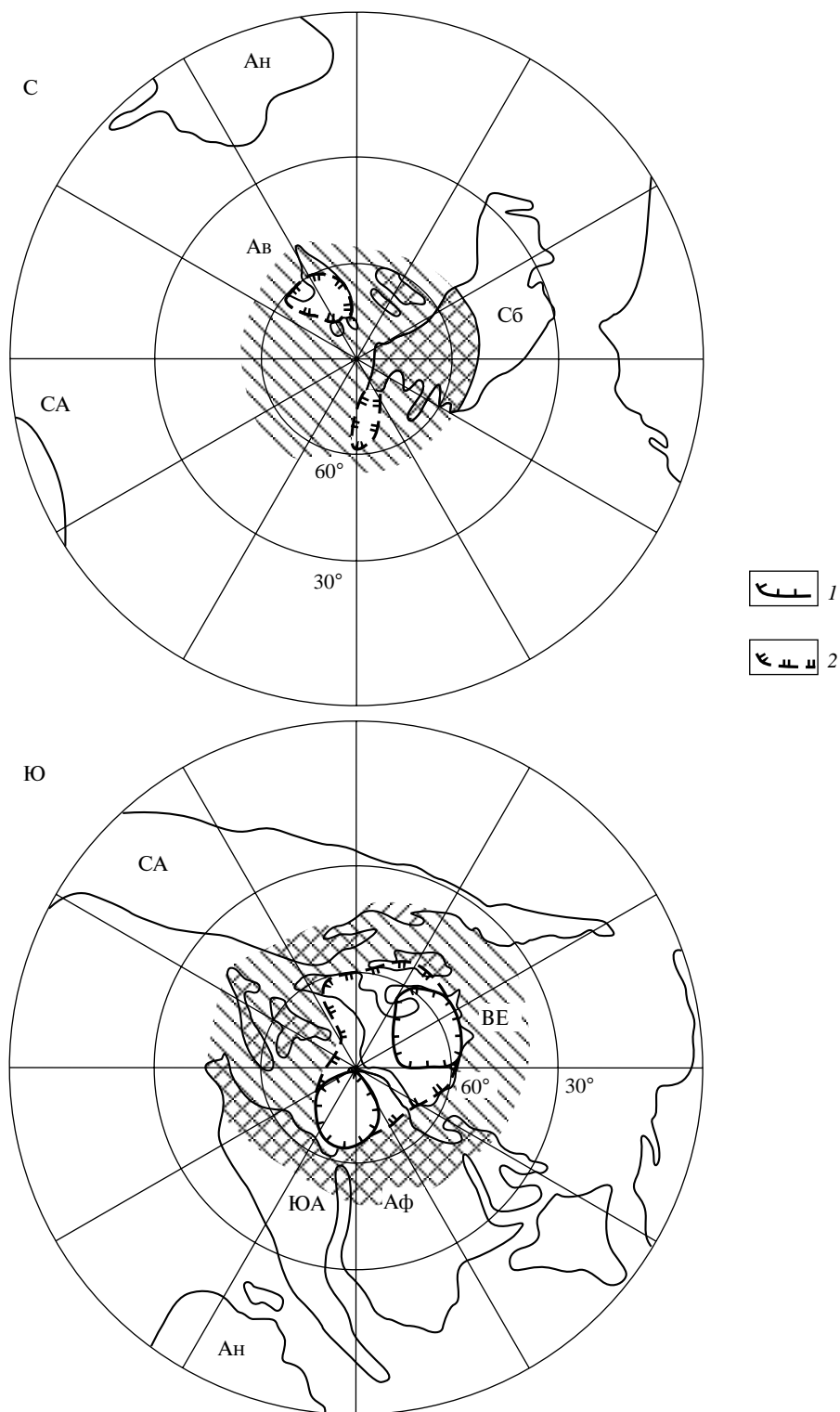


Рис. 2. Распространение ледниковых покровов, морских льдов и многолетней мерзлоты в лапландском периоде. Положение материков дано по В.Е. Хаину и Н.А. Ясаманову (1987) в циркумполярной проекции.

1 – районы оледенения по Н.М. Чумакову (1978), 2 – области максимально возможного распространения ледниковых покровов. Остальные условные обозначения на рис. 1.

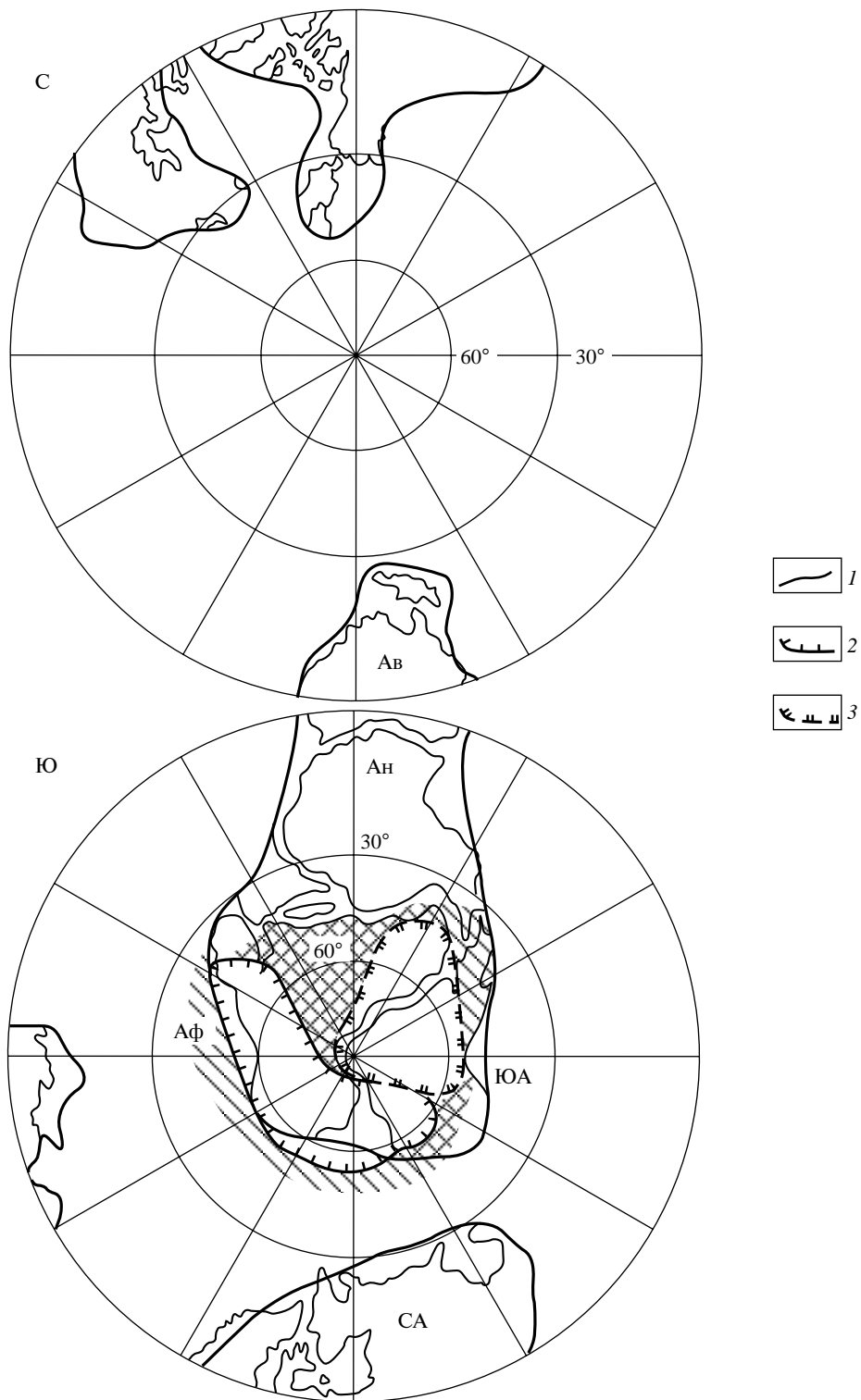


Рис. 3. Распространение ледниковых покровов, морских льдов и многолетней мерзлоты в позднеордовикском–раннесилурийском периоде. Положение материков дано по П. Морелю и Э. Ирвингу (1978) в циркулярной проекции.

1 – границы палеоконтинентов; границы максимально возможного распространения ледниковых покровов: 2 – в позднем ордовике–раннем силуре; 3 – в раннем силуре. Остальные условные обозначения на рис. 1.

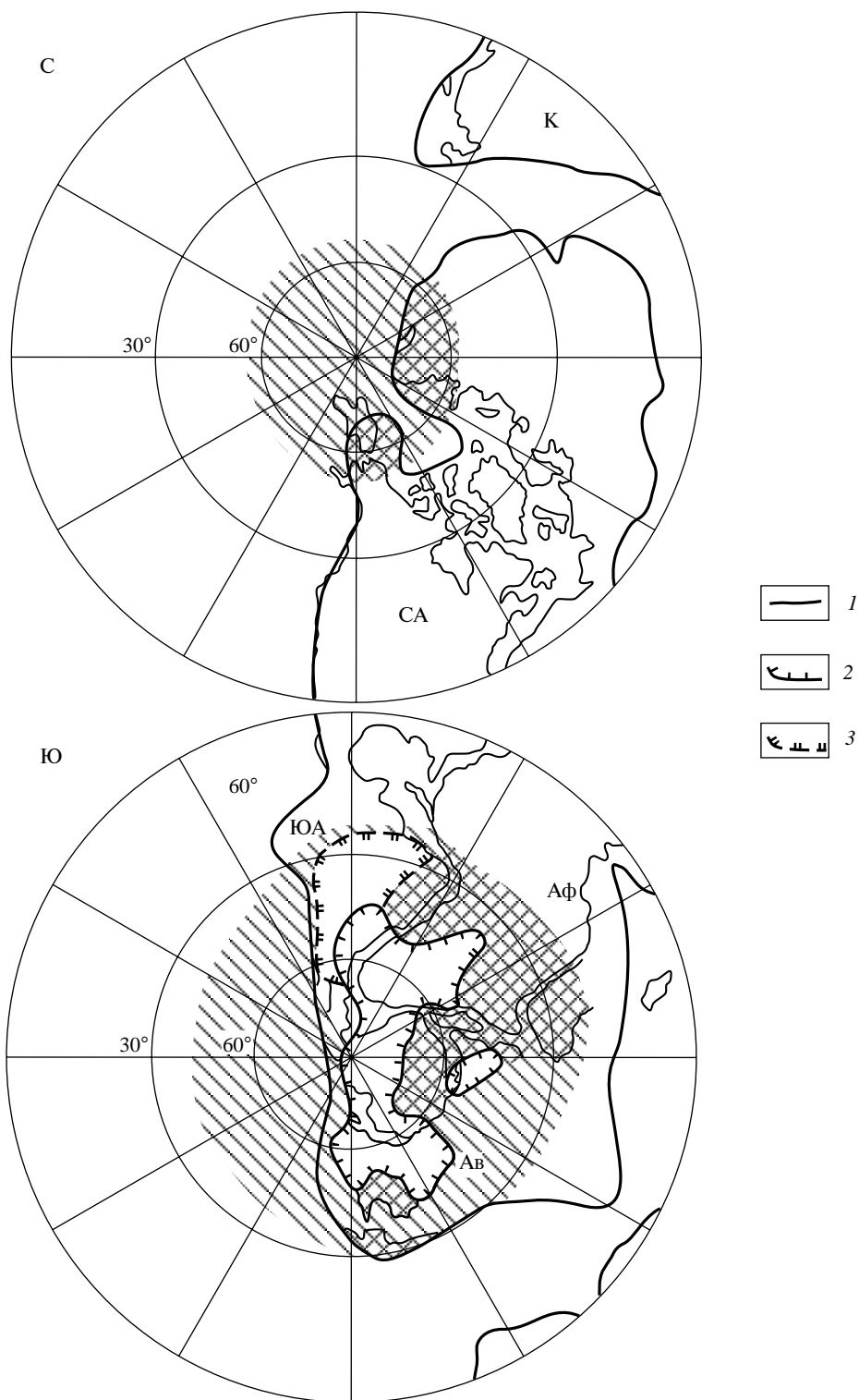


Рис. 4. Распространение ледниковых покровов, морских льдов и многолетней мерзлоты в позднекарбонном—раннепермском периоде. Границы возможного распространения ледниковых покровов: 1 — в позднем карбоне—ранней перми; 2 — в раннем—позднем карбоне. Остальные условные обозначения на рис. 1 и 3.

ледникового покрова Центральной Африки располагался около Замбези, откуда лед тек радиально в несколько африканских бассейнов и распространялся на Мадагаскар, Южную Африку и частично в Южную Америку [7]. Северная граница ледникового щита могла располагаться примерно на 50° южной палеошироты (см. рис. 4). При радиусе ледникового покрова примерно 1750 км, по нашим расчетам, толщина льда могла быть до 4 – 4,5 км.

В южном полушарии в конце карбона–ранней перми произошло общее воздымание Гондваны и покровное оледенение распространилось на большую часть этого суперконтинента. Позднепалеозойское оледенение началось на западе Южной Америки. В начале среднего карбона южный полюс находился в пограничном районе Антарктиды, Африки, Южной Америки [5]. В верхнем карбоне в южной полярной и субполярной областях оказались Антарктида, юг Африки и Южной Америки, Мадагаскар, Индия и юг Австралии. Каменноугольно–пермский ледниковый период длился по крайней мере 100 млн. лет, однако не было единой большой ледниковой шапки. Пик ледникового периода, когда ледниковые покровы распространялись далеко к северу (до 30° – 35° ю.ш.), длился около 40 млн. лет (между 310 – 270 млн. лет назад).

По нашим расчетам, области оледенения Гондваны в карбоне–перми занимали площадь не менее 35 млн. км² (возможно, и 50 млн. км²), что в 2 – 3 раза превышает площадь современной Антарктиды. Ледниковые покровы достигали 30° – 35° ю.ш. Удаленность от источников влаги и высокая отражательная способность поверхности территории привели к сильному выхолаживанию континентальной части Гондваны, к снижению температур в низких широтах. За пределами ледниковых щитов в континентальной части Гондваны перигляциальная зона могла простираться до 15° – 20° ю.ш. и ее ширина достигала 2 – 3,8 тыс. км.

В северном полушарии верхнепалеозойские ледниково–морские отложения обнаружены на северо–востоке России. Основным центром оледенения является район Охотского моря, который, по-видимому, находился около Северного полюса. Логично предположить существование многолетнемерзлых пород в Якутии (от Лены до Колымы) и на западе Чукотки, расположенных в перми в высоких палеоширотах (севернее 60-й параллели).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Причины возникновения и эволюции мерзлых толщ в истории Земли условно подразделяются на

внешние (космические или астрономические) и внутренние (земные или планетарные). Внешние причины, вызывающие уменьшение поступления солнечного тепла к планете, связывают обычно с вариациями астрономических и космических факторов в Солнечной системе и за ее пределами. Внутренние причины обусловлены как необратимостью развития атмосферы, литосферы и недр Земли (снижение потока радиогенного тепла из недр Земли, прогрессирующее увеличение площади суши на планете, изменение содержания в атмосфере углекислого газа и кислорода), которые в сумме должны приводить к направленному похолоданию климата, так и с периодическими и эпизодическими изменениями геологических и географических факторов (образование суперконтинентов и их дрейф в умеренные и высокие широты, горообразование, зарождение и саморазвитие горных ледников и ледниковых покровов, океаническая и атмосферная циркуляция). Очевидно, что оледенение и многолетнее промерзание горных пород развиваются при формировании на поверхности Земли уровня теплообмена, который обеспечивает существование отрицательной температуры.

Следует подчеркнуть, что формирование толщ мерзлых пород на планете связывается не только с периодами развития покровных оледенений. На отдельных частях континентов могли существовать такие условия, когда из-за недостаточной влагообеспеченности ледники развиваться не могли, а происходило промерзание верхней части литосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумаков Н.М. Докембрийские тиллиты и толлоиды (проблемы докембрийских оледенений) // Труды ГИН. Вып. 308. М.: Наука, 1978. С. 202.
2. Hambrey M.J., Harland W.B. The Late Proterozoic Glacial Era // Palaeogeogr., palaeoclim., palaeoecol. № 51. 1985. P. 255 – 272.
3. Зотиков И.А. Тепловой режим ледникового покрова Антарктиды. Л.: Гидрометеоздат, 1977. С. 168.
4. Величко А.А. Природный процесс в плейстоцене. М.: Наука, 1973. С. 256.
5. Ушаков С.А., Ясаманов Н.А. Дрейф материков и климаты Земли. М.: Мысль, 1984. С. 206.
6. Caputo M.V. Late Devonian glaciation in South America. // Palaeogeogr., palaeoclim., palaeoecol. № 51. 1985. P. 291 – 300.
7. Доценко С.Б. Об оледенении Земли в конце палеозоя // Жизнь Земли. Геодинамика и минеральные ресурсы. М.: Изд-во МГУ, 1988. С. 46 – 52.