Москва. ГЕОС 2009

МЕЛ-КАЙНОЗОЙСКИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ АРКТИКИ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

М.А. Левитан

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва

В последние годы интерес широких кругов общественности (в том числе и научной общественности) прикован к так называемой проблеме глобального потепления XX-XXI вв. и прогнозам последствий парникового эффекта, который, по мнению ряда специалистов, обусловлен техногенными выбросами парниковых газов и прежде всего - CO_2. В связи с этим кажется целесообразным сделать обзор истории потеплений в Арктике, происшедших в те времена, когда человеческое общество или не существовало вообще, или (в четвертичное время) не обладало развитой техникой, сравнимой с ее современными возможностями. Этот обзор не претендует на исчерпывающую полноту. Автор планирует сделать акцент на полученных в последние годы результатах, касающихся непосредственно Арктики, особенно Центральной Арктики.

Прежде всего следует указать на то, что многочисленные природные явления, трактуемые как результат происходящего в современную эпоху потепления (вековые тренды уменьшения площади морского льда в Северном Ледовитом океане, подъем снеговой линии и уменьшение суммарного объема горных ледников, углубление поверхности многолетнемерзлых пород и т.д.), наиболее четко проявлены в Северном полушарии, особенно к северу от 65° с.ш. [*Фролов и др., 2007*]. В Южном полушарии за последние 100 лет среднегодовая площадь развития морского льда практически оставалась постоянной [*Chapellaz, 2008*]. Таким образом, о глобальности происходящего потепления говорить не приходится.

С другой стороны, нельзя обойти вопрос о продолжительности тренда потепления. В Северном полушарии потепление началось после окончания так называемого «малого ледникового периода» (около 1900 г.), который, в свою очередь, продолжался 150-200 лет [*Zeeberg et al., 2003*]. Упомянутый тренд выявляется на фоне климатических колебаний с периодом около 30 лет, соответствующим периодам как северо-атлантических, так и арктических осцилляции, оказывающих во многом определяющее влияние на климат Арктики [*Фролов и др., 2007*]. Если иметь в виду более продолжительные периоды времени, то необходимо отметить, что последнее межледниковье (микулинское) продолжалось около 12 тыс. лет, а современное (голоцен) длится уже 11,5 тыс. лет.

Как известно, для Арктики характерна резко выраженная сезонность климата. Если говорить о среднезимних и среднелетних температурах нижних слоев атмосферы и поверхностного слоя морской воды (соответственно, для января и июля), то упрощенные схемы распределения температур выглядят следующим образом [*Атлас Арктики, 1985*]. В январе температура воздуха ниже -32°С преобладает в районе Северного полюса, над Канадской котловиной и Гренландией (до -40°С). Над западно-арктическими морями температура выше -25°С, а над восточно-арктическими - в среднем около -30°С. В июле вокруг Северного полюса и над Гренландией температура воздуха не превышает 0°С, над восточной Арктикой она колеблется в диапазоне от 0 до +4°С, а над Баренцевым морем - выше +4°С. В январе температура поверхностного слоя морской воды практически повсеместно ниже -1°С (до -1,7°С). В июле ситуация более разнообразная: вокруг полюса сохраняются отрицательные температуры, у берегов Евразии доминируют температуры от +1 до +4°С, причем у берегов Баренцева моря они доходят до +8-10°С.

Обратимся теперь к палеоклиматам. Широко известно, что в истории климата Земли существовал переход от парниковых условий для ряда эпизодов позднеюрского-мелового времени до ледниковых условий конца кайнозоя [*Монин, Шишков, 1979*]. Этот кайнозойский тренд похолодания не имел линейного характера, поскольку в это время наблюдались и многочисленные явления потепления.

Наиболее яркими приметами парникового климата юры-мела являются черные сланцы. В Арктике наиболее древние черные сланцы (насколько нам известно) относятся к берриасу и залегают у берегов Норвегии на 76° с.ш. (55° северной палеошироты) [*Langrock, 2003*]. Содержание органического углерода преимущественно морского генезиса в этих породах колеблется обычно от 5 до 20%, достигая в исключительных случаях 36% $C_{орг}$. На переходе от сеномана к турону (OAE 2 - океаническое аноксическое событие 2) черные сланцы формировались в условиях повышенной температуры воды и увеличения роли органического вещества морского происхождения. В это время изотерма +20°С среднегодовой температуры поверхностной водной массы доходила до 58° северной палеошироты [*Langrock, 2003*], а температура поверхностных океанических вод тропиков превышала современную на 5°С [*Forster et al., 2007*]. Среднее парциальное давление CO_2 в атмосфере составляло более 1300 ppт [*Fletcher et al., 2008*] (во время максимума последнего оледенения оно было равным 280 ppт [*Котляков, 2000*]). Обобщение имеющегося материала позволило нам выдвинуть собственную концепцию последовательности событий при глобальном формировании черных сланцев во время OAE 2: глобальная трансгрессия - резкая гумидизация климата (с соответствующим возрастанием содержания водяного пара - важнейшего парникового газа - в атмосфере) - повышение температуры атмосферы - повышение парциального давления CO_2 в атмосфере - формирование морских карбонатов и черных сланцев с положительной аномалией изотопного состава углерода [*Левитан и др., 2009*]. Доказанная периодичность седиментации - 100 тыс. лет - не оставляет сомнений в климатической природе этого явления. К позднему мелу относится и формирование черных сланцев, поднятых геологическими трубками на подводном поднятии Альфа в Центральной Арктике [*Jackson et al., 1985*].

На острове Новая Сибирь, входящем в архипелаг Новосибирских островов, деревяногорская свита турона, состоящая из вулканогенных и терригенных угленосных отложений, вмещает многочисленные остатки палеофлоры. По морфологии листьев определена среднегодовая температура воздуха +8,8°С, средняя летняя температура - +16,6°С, средняя зимняя - +1,8°С; среднее количество осадков в вегетационный период превышало 600 мм [*Герман, 2009*].

Исключительно важное значение в рамках рассматриваемой темы имеют данные глубоководного бурения на подводном хребте Ломоносова в 250 км от Северного полюса (между 87 и 88° с.ш.) [*Backman et al., 2006*]. В основании разреза вскрыты породы нижнего кампана. Для них по методу ТЕХ86 установлены летние температуры поверхностной водной массы порядка +15°C [*Jenkyns et al., 2004*]. Затем они постепенно поднялись до 18°C в позднем палеоцене и на границе палеоцена и эоцена (55 млн. лет назад, во время PETM - палеоцен-эоценового термического максимума, продолжавшегося 200 тыс. лет) скачком достигли +24°C [*Sluis et al., 2006*]. При этом PETM характеризуется превышением температуры над предыдущим периодом на 5°C в тропиках и на 8°C - в Арктике. Одновременно среднегодовая температура воздуха над континентальными массами Арктики поднялась от +17°C перед PETM до +25°C во время этого события [*Williams et al., 2008*]. В Северной Америке и в Арктике PETM характеризуется повышенной гумидностью климата и весьма высоким парциальным давлением CO_2 в атмосфере - свыше 1100 ppm [*Schouten et al., 2007*]. В кайнозое именно PETM считается самым теплым периодом времени.

Сразу после этого события, в начале раннего эоцена (вплоть до 53,5 млн лет) зафиксировано небольшое снижение температуры, сменившееся глобальным раннеэоценовым климатическим оптимумом [*Zachos et al., 2001*] (53,5-49,5 млн лет), выраженным в Арктике изотопно-углеродным событием Эльмо [*Stein et al., 2006*]. К концу этого периода времени, согласно палеотемпературным данным по алкенонам [*Weller, Stein, 2008*], температура поверхностных вод достигла уровня +24-25°C. Вероятно, эти данные несколько завышены по сравнению с методом TEX.

С событием Azolla (обильным притоком в Арктику пресноводных спор рода Azolla, происшедшим 48,6-48,3 млн лет назад) связано резчайшее похолодание поверхностных вод до +10°C [*Brinkhuis et al., 2006*]. Сразу после этого события температура поднялась до +13°C, а вскоре (46,3 млн лет назад) в осадочном разрезе хребта Ломоносова отмечено первое появление грубообломочного материала ледового разноса [*Backman et al., 2006*] на фоне низких (менее +15°C) температур поверхностных вод [*Weller, Stein, 2008*], совпавшим с глобальным трендом похолодания [*Zachos et al., 2001*] после раннеэоценового климатического оптимума. К 44,8 млн лет температура поверхностных вод составляла уже +10°C, и считается, что примерно с этого возраста в Арктике начались сезонные похолодания [*Weller, Stein, 2008*]. На основе данных по изотопному равновесию между пресноводными карбонатами и водой, в которой они сформировались на континентах, окружающих Арктику, для среднего эоцена (около 80° с.ш., 45 млн лет) была предположена средняя температура воды +13°C [*Jahren, Sternberg, 2003*]. Эти оценки хорошо совпали с палеотемпературными оценками по алкенонам, сделанными по материалам глубоководного бурения [*Weller, Stein, 2008*]. Отметим, что послераннеэоценовое похолодание отражено и в данных по парциальному давлению CO_2 в атмосфере: если в начале раннего эоцена отмечались очень высокие значения (несколько тысяч ppm), то в среднем эоцене в основном они были ниже 1000 ppm, достигая временами значений 200-300 ppm [*Pearson, Palmer, 2000*].

Вверх по разрезу по результатам бурения обнаружен перерыв в осадконакоплении продолжительностью 26 млн лет [*Backman et al., 2006*]. Поэтому дальнейшая палеотемпературная информация в основном взята из других опубликованных данных. Судя по глобальным материалам по изотопно-кислородному составу раковин бентических фораминифер [*Zachos et al., 2001*], тренд похолодания довольно плавно после среднего эоцена продолжился и в позднем эоцене. Однако на границе эоцена и олигоцена (около 38 млн лет назад) этот плавный тренд сменился очень резко выраженным падением температуры морской воды, так называемым терминальным эоценовым явлением (TEE), которое многие исследователи расценивают как границу между «парниковым» миром и «ледниковым» миром [*Miller et al., 1987*]. При этом концентрация CO_2 в атмосфере заметно снизилась [*Pagani et al., 2005*]. Следующий глобальный эпизод столь же сильного похолодания, занявший около 500 тыс. лет, приходится на границу между ранним и поздним олигоценом (уровень 27,1 млн лет). В частности, он выражен внезапным появлением и сильным возрастанием численности динофлагеллят рода Svalbardella в южном и северном полушариях [*Van Simaeys et al., 2005*]. Если исключить последнее событие, то приходится констатировать лишь очень слабое похолодание Мирового океана в олигоцене после ТЕЕ (вплоть до примерно 26 млн лет) [*Zachos et al., 2001*].

Начиная с уровня 26 млн. лет (поздний олигоцен) происходит резкое (примерно на 4°С) потепление и в целом довольно теплые условия сохранялись примерно до середины миоцена (13 млн. лет) [*Zachos et al., 2001*]. Например, в соответствии с палеофлористическими данными, в восточной части Канадской Арктики (о. Девон) в раннем миоцене существовал гумидный умеренный климат со среднегодовой температурой воздуха от +8 до +12°С. Для среднего миоцена Северной Аляски реконструированы среднегодовые температуры воздуха порядка +9°С. В центральной Аляске между 13 и 12 млн. лет произошло резкое снижение среднегодовой температуры воздуха с +11 до +4°С [*Williams et al., 2008*], а в разрезе глубоководного бурения на хребте Ломоносова стали доминировать ледниково-морские отложения [*Backman et al., 2006*]. Отметим, что это событие произошло примерно на 1 млн лет позже покровного оледенения Западной Антарктиды. Тренд похолодания сохранился до 5 млн лет назад.

Ранний плиоцен в Арктике был очень теплым: для торфяных отложений о. Элсмир возрастом 5-4 млн лет по сложной методике, включающей изотопно-кислородные исследования и измерения ширины ежегодных древесных колец в *Larix* cf. *groenlandii*, определена среднегодовая температура воздуха +5,5±1,9°С, что на 14,2°С теплее, чем современная температура [*Ballantyne et al, 2006*]. Считается, что внезапное чрезвычайно сильное потепление атмосферы Арктики на 10°С, происшедшее 4 млн лет назад [*Elias, Matthews, 2002*], ассоциируется с сокращением площади континентального ледового покрова в Арктике и с увеличением температуры поверхностной водной массы в Северной Атлантике и в северной половине Тихого океана [*Haywood et al., 2001*]. Среднеплиоценовый термический оптимум [*Dowsett et al., 1996*] фактически распространился на весь поздний плиоцен: судя по многочисленным данным по морским остракодам, между 3,5 и 2,0 млн лет средние зимние и средние летние температуры морской воды по окраинам Северного Ледовитого океана превышали, соответственно, 0°С и +3°С [*Cronin et al., 1993*]. Это означает, что летом, как минимум, существовали в ряде районов этого океана области без покрова морского льда.

Вряд ли целесообразно подробно останавливаться на четвертичных колебаниях температур в Арктике. В настоящем обзоре будут представлены некоторые новейшие данные по отложениям межледниковий и по голоцену. Например, на севере европейской части России оцененные по результатам спорово-пыльцевых анализов среднегодовые температуры воздуха для вишерского межледниковья были на 4-6°С выше современных, по чирвинскому межледниковью - на 2-4°С, в родионовское время - на 4°С выше [*Андреичева и др., 2009*]. Предыдущие глобальные исследования для последнего межледниковья выявили, что это время - 130-118 тыс. лет назад - (и особенно его первая половина) было самым теплым за последние 250 тыс. лет и среднегодовая температура воздуха Земли была выше современной на 0-2°С [*CLIMAP..., 1984*]. Соответствующие более поздние исследования по широкому кругу палеотемпературных индикаторов, проведенные в Арктике, показали что в этом регионе для данного межледниковья температурная аномалия была выражена сильнее: к северу от 65° с.ш. средняя летняя температура воздуха была выше современной на 4-5°С [*Miller et al., 2006*]. При этом практически везде существовали более гумидные условия. Кровля промежуточной водной массы в Центральной Арктике, сложенной теплыми атлантическими водами, находилась на уровне 50-30 м (по сравнению с современной глубиной более 200 м). Причиной такого явления считается ярко выраженное увеличение инсоляции в высоких широтах северного полушария и усиленный приток теплых атлантических вод из северной Атлантики [*Miller et al., 2006*].

В начале голоцена (11270 кал. лет назад, судя по результатам изучения ледового керна в Гренландии) [*Kobashi et al., 2008*], а также по данным исследования насекомых в осадках двух озер на о. Баффина (Канадская Арктика) среднегодовая температура воздуха была выше современной примерно на 4°C [*Francis et al., 2006*]. В конце голоценового оптимума и начале суббореала на севере европейской части России воздух был примерно на 2-3,5°C теплее, чем в современную эпоху [*Андреичева и др., 2009*]. Масштабное изучение голоценового термического оптимума в западной Арктике (от 0 до 180° западной долготы, к северу от 60° северной широты) выявило превышение локальных температур воздуха над современными в среднем на 1,6±0,8°C [*Kaufman et al., 2004*]. При этом на северо-западе Северной Америки пик потепления пришелся на период с 12 до 10 тыс. кал. лет назад, а на Аляске и в северо-западной Канаде - между 11 и 9 тыс. кал. лет назад. Интересно, что такая же асимметрия свойственна и современному потеплению, наблюдаемому в течение последних нескольких десятилетий [*Kaufman et al., 2004*]. Остается добавить, что в течение всего миоцена-квартера парциальное давление CO_2 в атмосфере не превышало 250-300 ppm [*Pearson, Palmer, 2000*].

Даже по приведенным (далеко не полным) данным можно сделать ряд однозначных выводов. Во-первых, на фоне глобального кайнозойского тренда похолодания в Арктике существовали многочисленные периоды потеплений и воздуха, и поверхностной водной массы, причем иногда они развивались в течение короткого промежутка времени и были довольно интенсивными. Во-вторых, чаще всего такие потепления сопровождались и повышениями парциального давления CO_2 в атмосфере, хотя имеются различные точки зрения относительно причин и следствий в этой зависимости. В-третьих, описанные явления имеют чисто природные причины и никак не связаны с техногенным поступлением парниковых газов. Представляется, что необходимо пристально разобраться в существующих и ранее существовавших прямых и обратных природных связях между различными парниковыми газами, температурой атмо- и гидросферы, оледенениями, характером альбедо, растительностью, солнечной инсоляцией, жидким стоком рек, адвекциями теплых атлантических и тихоокеанских вод в Арктику, термохалинной циркуляцией, газообменом между атмо- и гидросферой и многими другими сложными природными явлениями. Разумеется, необходимо объективно оценить и роль антропогенного загрязнения в процессах современного регионального потепления. Скорее всего, на имеющемся уровне понимания соответствующих проблем еще рано делать твердые выводы о причинах современной климатической ситуации.

Литература

Андреичева Л.Н., Голубева Ю.В., Марченко-Вагапова Т.И. Изменение природной среды и климата в Арктике в четвертичное время // Мат-лы совещ. «Геология полярных областей Земли». М: ГЕОС, 2009. С. 7-11.

Атлас Арктики. М.: ГУ геодез. и картограф. Совмин. СССР, 1985. 204 с.

Герман А.Б. Среднемеловые флоры Новосибирских островов и «вымерший» климат меловой Арктики // Мат-лы совещ. «Геология полярных областей Земли». М.: ГЕОС, 2009. С. 124-128.

Котляков В.М. Гляциология Антарктиды. М: Наука, 2000. 432 с.

Левитан М.А., Алексеев А.С., Бадулина Н.В. и др. Геохимия пограничных сеноман-туронских отложений Горного Крыма и северо-западного Кавказа // Геохимия. 2010. № 6. С. 570-591.

Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 407 с.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П. и др. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 135 с.

Backman J., Moran K., McInroy D.B. et al. Proc. Integrated Ocean Drill. Program. 2006. V. 302, doi.10.2204/iodp.proc.302.104.2006.

Ballantyne A.P., Rybczynski N., Baker P.A. et al. Pliocene Arctic temperature constraints from the growth rings and isotopic composition of fossil larch // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2006. V. 242. P. 188-200.

Brinkhuis H., Schouten S., Collinson M.E. et al. Episodic fresh surface waters in the Eocene Arctic Ocean // Nature. 2006. V. 441. P. 606-609.

Chappellaz J. Past climate dynamics from ice cores: where we stand? Where we go? // Abstr. SCAR/IASC IPY Open Sci. Conf. «Polar Research - Arctic and Antarctic perspectives in the International Polar year». St. Petersburg. 2008. P. 8.

CLIMAP Project Members. The Last Interglacial ocean // Quatern. Res. 1984. V. 21. P. 123-224.

Cronin T.M., Whatley R., Wood A. et al. Microfaunal evidence for elevated Pliocene temperatures in the Arctic Ocean // Paleoceanography. 1993. V. 8. № 2. P. 161-173.

Dowsett H.J., Barron J., Poore R.Z. Middle Pliocene sea surface temperatures: a global reconstruction // Mar. Micropaleontol. 1996. V. 27 (1-4). P. 13-25.

Elias S.A., Mattews J.V. Arctic North American seasonal temperatures from the latest Miocene to the Early Pliocene, based on mutual climatic range analysis of fossil beetle assemblages // Can. J. Earth Sci. 2002. V. 39 (6). P. 911-920.

Fletcher B.J., Brentnall S.J., Anderson C.W. et al. Atmospheric carbon dioxide linked with Mesozoic and early Cenozoic climate change // Nature Geoscience. 2008. V. 1. P. 43-48.

Forster A., Schouten S., Moriya K. et al. Tropical warming and intermittent cooling during the Cenomanian/Turonian oceanic anoxic event 2: Sea surface temperature records from the equatorial Atlantic // Paleoceanography. 2007. V. 22. PA 1219, doi: 10.1029/2006PA001349.

Francis D.R., Wolfe A.P., Walker I.R., Miller G.F. Interglacial and Holocene temperature reconstructions based on midge remains in sediments of two lakes from Baffin Island, Nunavut, Arctic Canada // Palaeogeography, Palaeochmatology, Palaeoecology. 2006. V. 236. P. 107-124.

Haywood A.M., Valdes P.J., Sellwood B.W. et al. Modelling Middle Pliocene warm climates of the USA // Paleontologia Electronica. 2001. V. 4 (1).

Jackson H.R., Mudie P.J., Blasco S.M. Initial geological report on CESAR - The Canadian Expedition to study the Alpha Ridge, Arctic Ocean. Geol. Surv. Canada Paper. 1985. V. 84-22. 177 p.

Jahren A.H., Sternberg L.S.L. Humidity estimate for the Middle Eocene Arctic rain forest // Geology. 2003. V. 31 (5). P. 463-466.

Jenkyns H.C., Forster A., Schouten S., Sinninghe Damste J.S. High temperatures in the Late Cretaceous Arctic Ocean // Nature. 2004. V. 432. P. 888-892.

Kaufman D.S., Ager N.A., Anderson N.J. et al. Holocene thermal maximum in the western Arctic (0-180°W) // Quatern. Sci. Rev. 2004. V. 23. P. 529-560.

Kobashi T., Severinghaus J.P., Barnola J.-M. 4±1.5°C abrupt warming 11,270 years ago identified from trapped air in Greenland ice // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. doi: 10.1016/j. epsl.2008.01.032.

Langrock U. Late Jurassic to Early Cretaceous black shale formation and paleoenvironment in high northern latitudes // Ber. Polarforsch. 2003. № 472. 144 p.

Miller G., Anderson P., Bennike O. et al. Last Interglacial Arctic warmth confirms polar amplification of climate change // Quatern. Sci. Rev. 2006. V. 25. P. 1383-1400.

Miller K.G., Fairbanks R.G., Mountain G.S. Tertiary oxygen isotope synthesis, sea-level history, and continental margin erosion // Paleoceanography. 1987. V. 2. P. 1-19.

Pagani M., Zachos J.C., Freeman K.M. et al. Marked decline in atmospheric carbon dioxide concentrations during the Paleogene // Science. 2005. V. 309. P. 600-603.

Pearson P.N., Palmer M.R. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years // Nature. 2000. V. 406. P. 695-699.

Schouten S., Weltering M., Rijpstra W.I.C. et al. The Paleocene-Eocene carbon isotope excursion in higher plant organic matter: Differential fractionation of angiosperms and conifers in the Arctic // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. V. 258. P. 581-592.

Sluis A., Schouten S., Pagani M. et al. Subtropical Arctic Ocean temperatures during the Paleocene/Eocene thermal maximum // Nature. 2006. V. 441. P. 610-613.

Stein R., Boucsein B., Meyer H. Anoxia and high primary production in the Paleogene central Arctic Ocean: First detailed records from Lomonosov Ridge // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. LI8606, doi: 10.1029/2006GL026776.

Van Simaeys S., Brinkhuis H., Pross J. et al. Arctic dinoflagellate migrations mark the strongest Oligocene glaciations // Geol. Soc. Amer. 2005. V. 33. № 9. P. 709-712. doi: 10.1130/G21634.1

Weller P., Stein R. Paleogene biomarker records from the central Arctic Ocean (IODP Expedition 302): Organic-carbon sources, anoxia, and sea-surface temperature // Paleoceanography. 2008, doi: 10.1029/2007PA001472.

Williams Ch.J., Mendell E.K, Murphy J. et al. Paleoenvironmental Reconstruction of a Middle Miocene Forest from the Western Canadian Arctic // Palaeogeography, Palaeochmatology, Palaeoecology. 2008, doi: 10.1016/j.palaeo.2008.01.014

Zachos J., Pagani M, Sloan L. et al. Trends, rhythms, and abberations in global climate 65 Ma to Present // Science. 2001. V. 292. P. 868-893.

Zeeberg J.J., Forman S.L., Polyak L. Glacier extent in a Novaya Zemlya fjord during the «Little Ice Age» inferred from glaciomarine sediment records // Pol. Res. 2003. V. 22. P. 385-394.

Ссылка на статью:

Левитан М.А. **Мел-кайнозойский температурный режим Арктики (краткий обзор)**. В кн.: Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Выпуск 1.- М.: ГЕОС, 2009. с. 38-44.