

"Priroda" № 12, 2009

(Übersetzung vom russischen Original ins Deutsche  
von Bernd Hartmann)

## Paläoklima: Ein Zusatz zur Theorie von Milanković

von A.W. Bjalko

### Über den Autor



Dr. rer.nat. habil (phys.-mathematische Wissenschaften)  
**Aleksej Wladimirowitsch Bjalko**  
ist Mitarbeiter des *L. D. Landau Instituts für  
Theoretische Physik der Russischen Akademie der  
Wissenschaften* und erster Stellvertreter des Chefredak-  
teurs der Zeitschrift „Priroda“. Seine Fachgebiete sind  
die theoretische Physik und Geowissenschaften.

### Vorbemerkung

In den 1920-40-er Jahren entwickelte der serbische Astronom Milutin Milanković die kühne Theorie (in dem Sinne, dass damals die Mengen an Geodaten unzureichend waren), welche die klimatischen Zyklen erklärte[1]. In ihrer Grundlage lag die Asymmetrie der Erde – das Vorherrschen von Festland auf der nördlichen Halbkugel im Vergleich zur südlichen. Auf dem Festland bilden sich während der Kaltzeiten ausgedehnte Gletscher, welche die Albedo des Planeten erhöhen - eine Erhöhung des reflektierten Anteils des eingefallenen Sonnenlichts. Eben in den nördlichen Breiten ändert sich die Sonneneinstrahlung infolge der Variabilität astronomischer Parameter erheblich. Die Exzentrizität der Erde, welche heute 0,0167 beträgt, erreichte in der Vergangenheit eine Größe von 0,06, wobei sie sich (nicht periodisch) innerhalb charakteristischer Zeiträume von ca. 100.000 Jahren infolge interplanetarer Wechselwirkungen änderte. Auch aus diesem Grund ändert sich die Ausrichtung der Rotationsachse der Erde in Relation zum Perihel mit einer Periode von 41.000 bis 42.000 Jahren. Wenn der Planet das Aphel seines Orbits im Winter auf der Nordhalbkugel erreicht, ist die Insolation am geringsten und die Eismassen können somit wesentlich anwachsen. Innerhalb eines kurzen Sommers im Bereich des Perihels kann es aufgrund der erhöhten Albedo nicht auftauen. Nach 20.000 Jahren, wenn auf das Aphel der Sommer auf der Nordhalbkugel fällt, wachsen auf der Südhalbkugel die Eismassen nicht mehr wesentlich an (außer auf der Antarktis, für sie ist dort wenig Festland).

Die Komputermmodellierung des Klimas hat zweifellose Erfolge besonders hinsichtlich uns zeitlich naheliegender Zeitabschnitte. Jedoch war die Modellierung klimatischer Zyklen auf der Basis der Milanković - Theorie nicht besonders erfolgreich. Der Grund für das Misslingen lag offensichtlich darin, dass der ange-setzte physikalische Mechanismus der Klimasteuerung, wenn er sich ausschließlich auf die Variabilität der Albedo stützt, nicht ausreichend ist. Damit gelingt es nicht, den Hauptmangel der Milanković - Theorie zu überwinden – in ihr ist der Mechanismus des Ausganges von Kaltzeiten (des Überganges von Kalt- zu Warmzeiten – *Anm. d. Übers.*) nicht verankert.

Seit dem Ende der 1970-er Jahre hat sich unser Wissen über das Klimasystem wesentlich erweitert. Das heutige Klima hat sich bemerkbar erwärmt, was sich infolge der Wirkung des Treibhauseffektes im Zusammen-hang mit einem Überschuss von in die Atmosphäre ausgestoßenem CO<sub>2</sub> aus der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas vollzog. Außerdem wurde mit Hilfe von Bohrungen in Sedimentgesteinen und Gletschern eine große Menge von Daten angehäuft, die nicht nur über die Temperaturen sondern auch über die Gehalte von Treibhausgasen in der Atmosphäre vergangener Epochen Auskunft geben. Damit ergab sich die Mög-lichkeit, die Milanković - Theorie mit Aussagen der modernsten Ergebnisse der Erforschung des Paläoklimas zu ergänzen.

Bevor wir zu diesen Ergänzungen gelangen, sollten die allgemein bekannten Sachverhalte, welche das Kli-masystem des Planeten beschreiben, dargelegt werden.

## Die Wärmebilanz der Erde

Der auf die Erde einfallende Strom von Sonnenstrahlung  $W_0 = 1362 \text{ W m}^{-2}$  kann als konstant betrachtet wer-den. Ein Teil dieser Energie wird von Wolken und der Erdoberfläche ohne Frequenzänderung reflektiert: Die derzeitige Albedo gemäß Messungen der Helligkeit des Mondes in der Neumondphase beträgt  $A_0 = 0,297 \pm 0,005$ . Einige Prozente der eingestrahnten Sonnenenergie werden vom Ozon und Treibhausgasen der Atmosphäre - jedoch der größte Teil von der Erdoberfläche absorbiert, welche die Atmosphäre von unten her heizt. Der Wärmestrom gelangt über Konvektion nach oben und wird letztendlich im Mikrowellenbe-reich mit einem Spektrum nahe dem des Spektrums eines schwarzen Körpers in den Kosmos abgestrahlt. Die mittlere Strahlungstemperatur der Erde im Spektrum der Wärmestrahlung (Strahlungstemperatur  $T_{\text{rad}}$ ) lässt sich leicht aus der Gleichung der ein- und abgestrahlten Energie

$$T_{\text{rad}} = [W_0(1 - A_0)/4\sigma]^{1/4} = 255 \text{ K}$$

rechnerisch ermitteln. Dabei ist  $\sigma = 5,6705 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-4}$  die Stefan-Bolzmann-Konstante. Der Fehler der Bestimmung der aktuellen Albedo ist kleiner als 0,5 K. Das Spektrum dieser Strahlung hat sein Maxi-mum im Wellenlängenbereich um 10  $\mu\text{m}$ .

In der Vergangenheit änderte sich die Albedo der Erde  $A$  innerhalb erheblich größerer Schwankungsbreiten – weite Flächen waren von Gletschern belegt, welche das Licht gut reflektieren. Aber die Flächen der Ozeane,

welche nicht von Eis bedeckt waren, unterlagen nur geringfügigen Veränderungen. Deshalb erhöhte sich die Albedo insgesamt nicht wesentlich. Andererseits hängt die Strahlungstemperatur schwach von der Albedo ab. Ihr Verhältnis untereinander lässt sich mit der Proportion  $[(1 - A)/(1 - A_0)]^{1/4}$  ausdrücken. Somit führt eine Variabilität der Albedo von 10% zu einer Temperaturänderung von insgesamt 1% - weniger als 3 K.

Wie wir sehen, änderte sich in der Vergangenheit die Temperatur  $T_0$  an der Erdoberfläche im Bereich von  $12^\circ$  und blieb somit unverändert höher als  $T_{\text{rad}}$ . Zwei grundlegende Ursachen gibt es dafür: der Treibhauseffekt und der Energieaustausch zwischen der Atmosphäre und den Ozeanen.

**Der Treibhauseffekt** wurde zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts von S. Arrhenius vorausgesagt. Er wird durch die Anwesenheit von Gasen in der Atmosphäre hervorgerufen, die im Mikrowellenbereich absorbieren: Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ).

Diese drei Gase sind in der Atmosphäre verschieden verteilt. Kohlendioxid vermischt sich fast gleichmäßig über die gesamte Troposphäre und Stratosphäre. Die Dichte gesättigten Wasserdampfs ändert sich mit der Änderung der Temperatur exponentiell: Eine Abkühlung um  $10^\circ$  führt zu ihrer zweifachen Verringerung. Deshalb ist die Konzentration von Wasserdampf entlang der Erdoberfläche ungleichmäßig. Schlagartig sinkt sie oberhalb der Wolkendecke – hier vorliegende Wassertröpfchen können im Mikrowellenbereich nicht absorbieren.

Methanmoleküle absorbieren Mikrowellenstrahlung um zwei Größenordnungen mehr als Wasserdampf und Kohlendioxid, wobei ihre Konzentration um das 400 bis 600-fache geringer ist. Der Methanzyklus ist sehr kompliziert: Methan gelangt in das Wasser am Boden der Ozeane, wird von Bakterien bei der Zersetzung organischer Substanz generiert, wird wiederum von anderen Bakterien aufgenommen, wird bis zu  $\text{CO}_2$  in den gelösten Sauerstoff führenden Ozeanwässern oxidiert und ebenso in der Atmosphäre unter der Einwirkung ultravioletter Strahlung oxidiert. Sehr wichtig ist auch folgender Fakt: In den rezenten Ozeanen befindet sich in Tiefen von 300 bis 600 m unter einer geringmächtigen Sedimentbedeckung bedeutende Mengen von Methanhydrat ( $\text{CH}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Es handelt sich dabei um eine Verbindung im festen Aggregatzustand, welche sich im Gleichgewicht mit im Wasser gelösten Methan befindet. Die Methanhydratmenge steigt mit sinkenden Temperaturen und erhöht sich mit steigenden Temperaturen oder sinkendem Druck.

Die Atmosphäre strahlt in Höhen von 9 bis 12 km ab, wo die Troposphäre in die Stratosphäre übergeht und die Temperatur auch gleich der Strahlungstemperatur ist. Die Differenz zwischen den Temperaturen an der Erdoberfläche und der Strahlungstemperatur ist umso größer, je höher die Konzentration der Treibhausgase ist. Leider verwehrt sich bisher der Treibhauseffekt einer genauen Berechnung. Die Spektren der Quantenübergänge für jedes der genannten Moleküle sind bekannt. Sie stellen eine Anhäufung dünner Linien dar. Aufgrund ihrer häufigen Kollisionen mit anderen Luftmolekülen verwaschen sich die Energien dieser Übergänge in Folge des Prinzips der Unbestimmtheit, wodurch die Linienpalisaden den Bereich der Absorptionslinien überlappen. Für Gase mit konstantem Druck und konstanter Temperatur können diese Absorptionsspektren mit Hilfe komplizierter Programme [2] berechnet werden, wobei jedoch die Gesamtaufgabe der Be

rechnung der Energieübertragung durch Strahlung innerhalb der realen Atmosphäre derzeit nicht gelöst ist. Diesen Fakt sehen einige Gelehrte und auch weniger gelehrte als Möglichkeit an, den Treibhauseffekt zu negieren. Jedoch beweisen experimentelle Messungen der Absorption eindeutig die Bedeutung des Treibhauseffektes.

**Thermohaline Zirkulation.** Systeme, die von einem Wärmestrom durchströmt werden, befinden sich in der Regel nicht in einem wärmeenergetischen Gleichgewicht. Eine wesentliche Rolle in der Wärmebilanz unseres Planeten spielt der Weltozean, dessen Wärmekapazität um drei Größenordnungen höher als die der Atmosphäre ist. Er kann im Prinzip sowohl als Wärmequelle als auch als Ableiter von Wärme fungieren – das Resultat hängt vom komplizierten Bild seiner Strömung ab. Die mittlere Temperatur des Ozeans in der heutigen Epoche (276 K) ist bedeutend geringer als die Oberflächentemperatur (287 K = 14°C). Das spricht davon, dass der Ozean als Wärmequelle funktionierte und dabei die Atmosphäre aufheizte. Auf der Erde existieren drei Gebiete, wo kalte salzige Wässer von der Oberfläche in die Tiefen des Ozeans absinken: Ein Gebiet befindet sich südlich von Grönland und weitere zwei an den Ufern der Antarktis. Dies geschieht auf folgende Weise: Der Golfstrom bringt warme und salzige Wässer in den Norden, während des Polarwinters kühlen sie sich ab, schaffen es dabei aber nicht, sich mit den sie umgebenden weniger salzhaltigen Wässern zu vermischen und sinken ab\*. Es gibt auch ein entgegengesetztes Beispiel: In das Mittelmeer gelangt über die Meerenge von Gibraltar relativ kaltes Wasser aus dem Atlantik. Es strömt an der Oberfläche nach nach Osten und wird dabei allein durch die Verdunstung salziger. Zwischen Kreta und Zypern sinkt es ab, fließt nach Westen und schließlich gelangt es warm und nicht sehr salzig am Meeresboden in den Atlantik über selbiges Gibraltar.

Daraus folgt ersichtlicher Weise, dass aus dem Mittelmeer Wärme in den Ozean auf Grund der Abkühlung der regionalen Atmosphäre übertragen wird. Aber insgesamt ist der Ozean kälter als die Atmosphäre, was bedeutet, dass das System der langsamen thermohalinen Strömungen positiv auf die Wärmebilanz der Atmosphäre in der Nähe der Erdoberfläche einwirkt. Deshalb kann die globale Bilanz, auf deren Grundlage die Strahlungstemperatur bewertet wurde, nicht immer zu jeder Zeit genau ausgeglichen sein. Eine Ausgeglichenheit der Bilanz wird nur dann zu verzeichnen sein, wenn innerhalb eines hinreichend langen Zeitintervalls eine Relaxation des Ozeans zur sich astronomisch ändernden Insolation des Planeten und den Gehalten von Treibhausgasen in seiner Atmosphäre erfolgen konnte.

Eine Bestätigung einer derartigen Beschreibung des Klimasystems kann man bei der Analyse von Klimadaten aus dem Pleistozän anhand von Eisbohrkernen aus Grönland und der Antarktis erhalten. Diese Daten erlauben es auch, eine Reihe noch weiterführender Aussagen zu treffen.

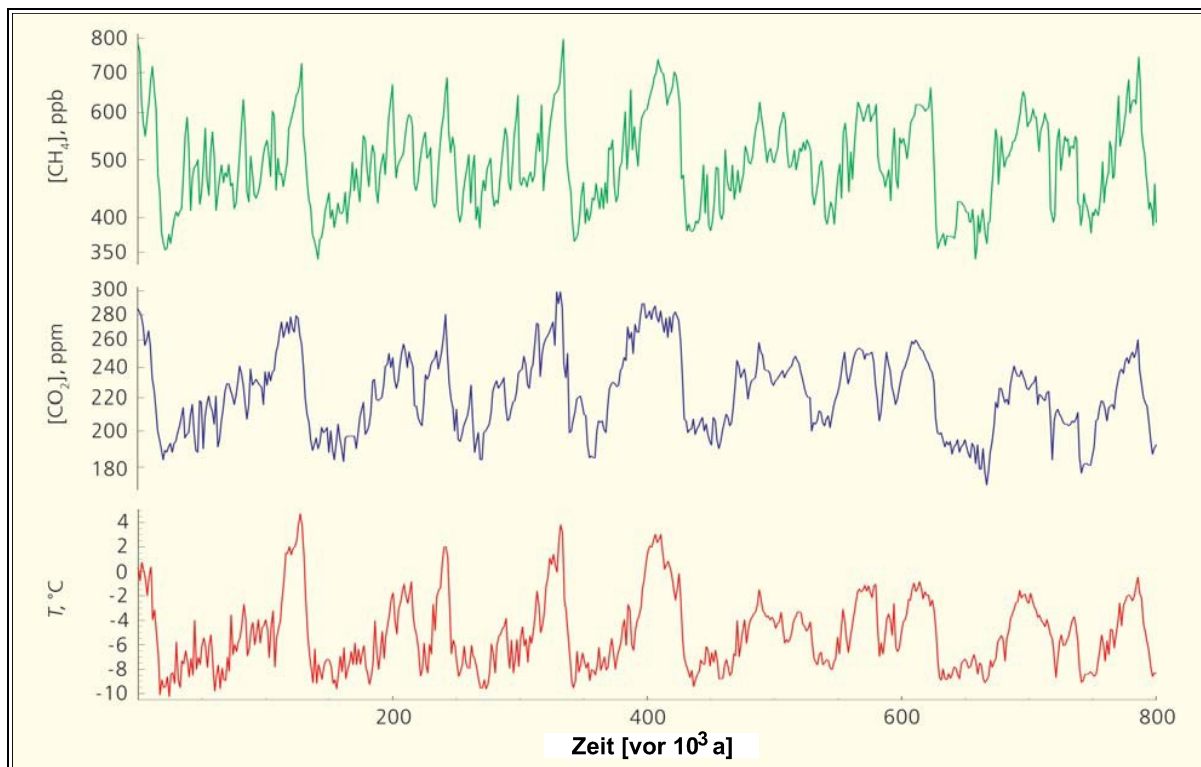
## **Die Variabilität des Klimas im Pleistozän**

Die Eisablagerungen der Gletscher der Antarktis und Grönlands tragen wichtige Informationen über vergangene Klimate in sich. Die saisonbedingte Schichtung des Eises erlaubt eine Altersbestimmung. Die atmos-

---

\*Eine analoge Erscheinung ist im Falle der Kuroshio-Strömung im Pazifik nicht zu beobachten, was davon zeugt, dass für das Absinken eine bestimmte Konfiguration von Uferlinien und dem Relief des Meeresbodens vorhanden sein muss.

phärischen Konzentrationen von Kohlendioxid und Methan lassen sich anhand der Analyse von im Eis eingeschlossenen Gasblasen feststellen. Schließlich lässt sich die mittlere Jahrestemperatur aus Abweichungen der Deuteriumkonzentration im Wasser rechnerisch ermitteln (Bei schwerem Wasser (DHO) besteht eine andere Abhängigkeit zwischen der Dichte des Dampfes und der Temperatur als bei Wasser (H<sub>2</sub>O)). Unlängst wurden ähnliche Angaben über derartige Analysen, welche von mehreren Forschungsteams durchgeführt wurden, in der Zeitschrift „Nature“ veröffentlicht [3, 4].



**Abb. 1:** Bohrergebnisse aus dem Eis der Antarktis - Die Klimageschichte der letzten 800.000 Jahre. (Die rote Linie kennzeichnet die Zeit beginnend von heute; die blaue Linie — die CO<sub>2</sub>-Konzentration in ppm; die grüne Linie — die CH<sub>4</sub>-Konzentration in ppb.) (Abb. nach „Priroda“)

Anhand der Grafiken aus Abb. 1 kann man feststellen, dass:

- erstens - die Wechselbeziehungen der drei Variablen ( $T$ ,  $[CO_2]$ ,  $[CH_4]$ ) untereinander hoch signifikant sind (die Ausdrücke in eckigen Klammern symbolisieren die atmosphärischen Konzentrationen der entsprechend durch ihre chemischen Formeln gekennzeichneten Gase);
- zweitens - die acht klimatischen Zyklen mit einer Zeitdauer ungefähr von jeweils 100.000 Jahren einander sehr ähnlich sind – sie beginnen mit einem schnellen Anwachsen (der Parameter), weisen deutlich ausgeprägte Maxima auf, wonach ein pulsierendes Sinken zu verzeichnen ist, was in der Regel mit ein Verharren auf niedrigem Niveau der Größen Temperatur und Kohlendioxidkonzentration, aber andererseits mit einem schroffen Absinken der Methankonzentration endet;
- drittens – die Abweichung von den Mittelwerten für  $[CH_4]$  maximal und für  $[CO_2]$  minimal ist;

- und schließlich bei der Durchsicht von Abb. 1 der natürliche Gedanke aufkommt, dass die Veränderlichkeit der Temperatur von der Änderung der Konzentrationen der Treibhausgase bestimmt wird. Weiter werden wir sehen, dass diese Schlussfolgerung voreilig und möglicher Weise auch unrichtig ist.

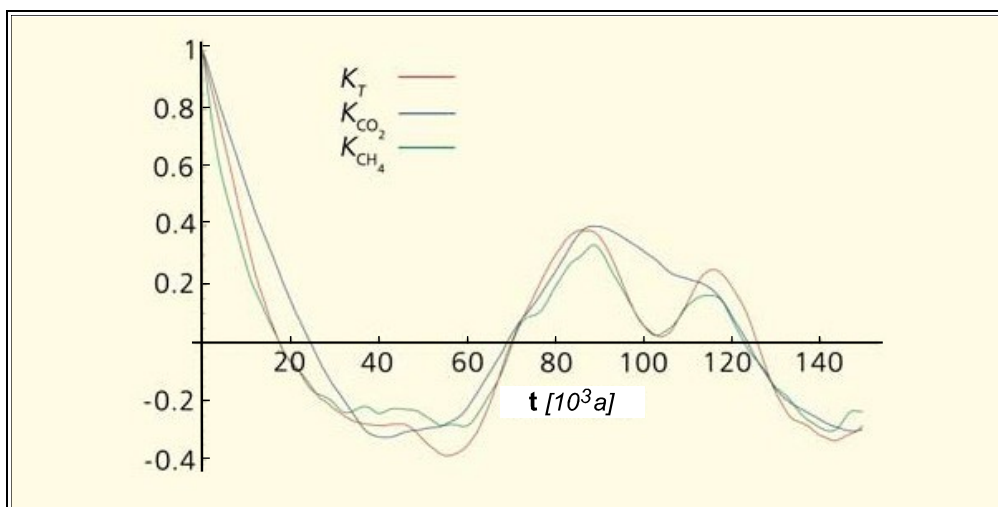
Die mittlere Temperatur auf der Antarktis innerhalb der letzten 800.000 Jahre erwies sich um  $5,1^\circ$  niedriger als die heutige, ihr Maximum aber um  $4^\circ$  höher. Nach Meinung des Autors sind diese Schwankungen eine Folge des veränderlichen Wärmeaustauschs zwischen Ozean und Atmosphäre. Die Rolle der Albedo ist dabei sekundär.

In der Veröffentlichung der Daten in „*Nature*“ wurde die Bilanz von Bohrarbeiten, chemischen und Isotopanalysen kolossalen Umfangs gezogen. Jedoch wurde eine standardmäßige mathematische Analyse dieser Abhängigkeiten, warum auch immer, nicht veröffentlicht, obwohl der Autor überzeugt ist, dass die Autoren damit vertraut sind. Ein möglicher Grund dafür ist die Eigenartigkeit der Resultate, welche sich keiner offensichtlichen Interpretation ergeben. Führen wir nun die mathematisch-statistische Bearbeitung dieser zeitabhängigen Beziehungen durch.

## Die Analyse der Klimadaten

Die Grafiken der Temperatur und der Konzentration der Treibhausgase aus der Publikation [3, 4] wurde digitalisiert und die erhaltenen Reihen mathematisch bearbeitet (Abb. 2).

**Die Funktionen der autokorrelativen Abhängigkeiten**  $T(t)$ ,  $[\text{CO}_2](t)$ ,  $[\text{CH}_4](t)$  sind sich untereinander ähnlich. Sie haben bei Null negative Ableitungen, was bedeutet, dass diese Funktionen nach der Zeit nicht differenzierbar sind. Der Autokorrelationskoeffizient des Kohlendioxids fällt bei kleinen Zeiten langsamer als bei den anderen Funktionen. D. h., dass  $[\text{CO}_2](t)$  die „glatteste“ der drei Funktionsgraphen bildet.

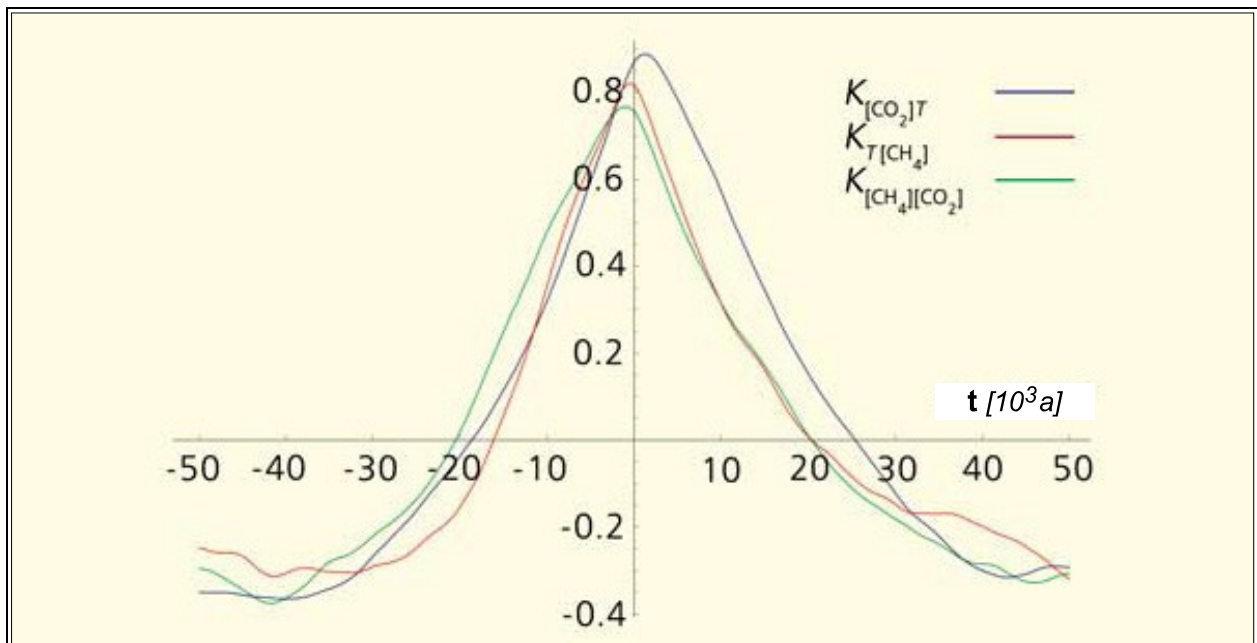


**Abb. 2:** Die Autokorrelationskoeffizienten der Temperatur (*rote Linie*), des Kohlendioxids (*blaue Linie*) und des Methans (*grüne Linie*) (Abb. nach „Priroda“)



Der Grund dafür wird später sichtbar – die Quellen von Kohlendioxid befinden sich im Ozean, dem Festland und in der Oxydation von Methan. Der Graph der Korrelationskoeffizienten von Methan fällt dagegen steil. Das zeugt davon, dass sein Verhalten weniger voraussagbar ist. Die Korrelationskoeffizienten nehmen negative Werte im Bereich von 20.000 Jahren an, weisen breite Minima im Bereich von 40.000 bis 60.000 Jahren auf, weitere Maxima befinden sich Bereich um 90.000 Jahren, wobei die Treibhausgase um 120.000 Jahre noch ein Maximum zeigen. Ein Minimum um 40.000 Jahre verwundert ein wenig, weil nach der Theorie von Milanković sich hier ein Maximum herausgebildet haben müsste. Dieses Maximum entstand tatsächlich - aber im Zeitintervall von vor 1,3 bis 2,7 Mill. Jahren [5]. In den Intervallen von 1,3–0,7 und 3,2–2,7 Mill. Jahren existieren beide Modi der Klimaschwankungen.

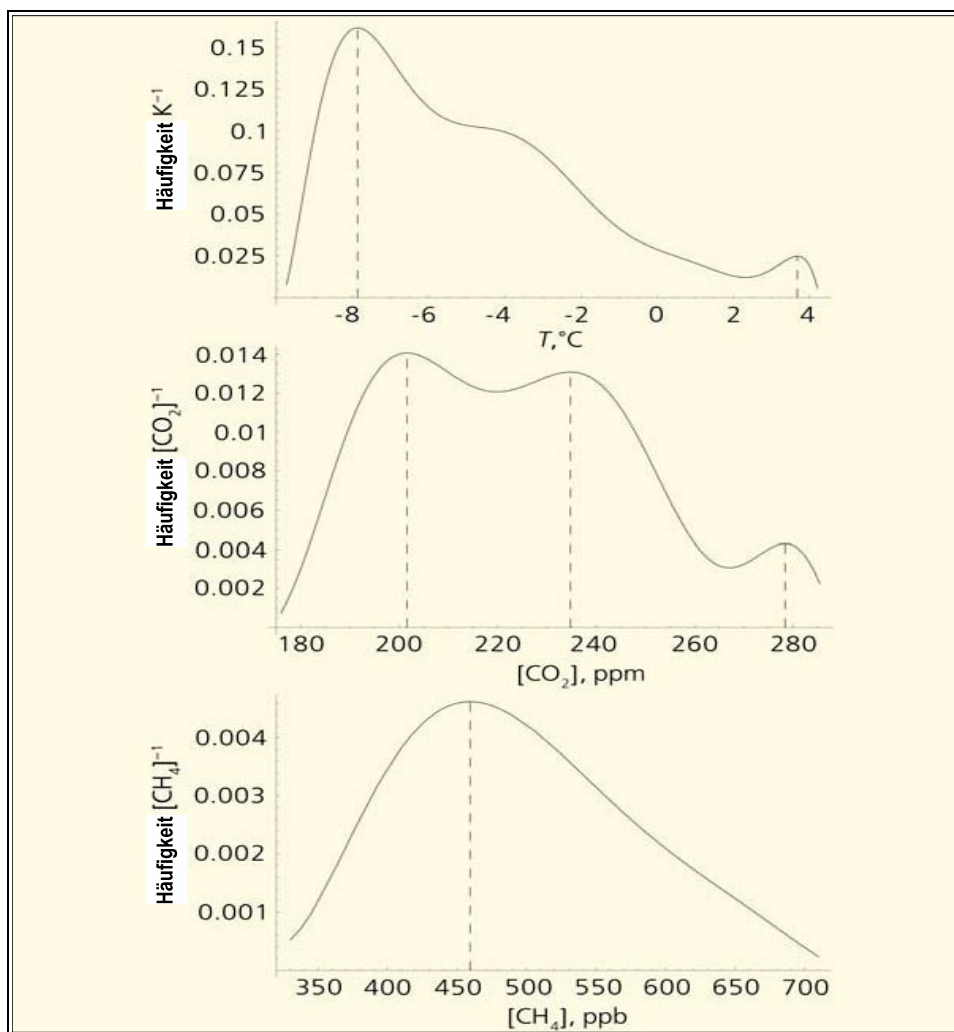
Die **korrelativen Beziehungen (Kovarianzen)** unterhalb der Variablen bzw. ihrer zeitabhängigen Funktionen sind noch inhaltsreicher. Sie sind mit einer höheren Auflösung nach der Zeit dargestellt, wobei die Verschiebung der Maxima dieser Funktionsgraphen nach vorn bzw. zurück bezüglich Null darüber Auskunft gibt, welche der Parametergrößen sich zuerst entwickeln bzw. primär, welche nachläufig bzw. sekundär sind und innerhalb welcher Zeiten dies geschieht. Aus Abb. 3 ist ersichtlich, dass bei kleinen Zeiten die Temperatur und  $[\text{CO}_2]$  eng miteinander verbunden sind, wobei das Maximum der Korrelationskoeffizienten von 0,88 mit einem „Vorlauf“ der Temperatur gegenüber  $[\text{CO}_2]$  ( $t$ ) von 2.000 Jahren erreicht wird. Die Genauigkeit der Berechnung des zeitlichen Nach- und Vorlaufs ist derzeit leider nicht sehr hoch und beträgt ca. 500 Jahre. Der Verlauf der Entwicklung der Temperatur und der Methankonzentration erweisen sich als fast synchron, jedoch liegt das Maximum ihrer Korrelation mit einem Koeffizienten von 0,82 etwas niedriger. Schließlich läuft die  $\text{CO}_2$ -Konzentration zeitlich der von Methan im Mittel um 1.500 Jahre hinterher; die maximale Größe des Korrelationskoeffizienten beträgt 0,74.



**Abb. 3:** Korrelationskoeffizienten zwischen Kohlendioxid — Temperatur (*blaue Linie*), Methan — Temperatur (*rote Linie*) und Methan — Kohlendioxid (*grüne Linie*). (Abb. nach „Priroda“)

Die Logik dieser „Nachläufigkeit“ kann mit der Oxydation von Methan zu Kohlendioxid erklärt werden. Jedoch der Umstand, dass der  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Atmosphäre hauptsächlich der Temperatur folgt, stellt ein Paradoxon dar, welches der Vorstellung über den Treibhauseffekt als solchem als Hauptregulator der Temperatur an der Erdoberfläche widerspricht. Der Idee nach müsste es umgekehrt sein: Aufgrund der Wärmeträgheit der Ozeane wäre einige Zeit erforderlich, um eine Temperatur an ihrer Oberfläche zu erreichen, die der, warum auch immer, sich verändernden Konzentration des Haupttreibhausgases entspräche. Verlegen wir die Darlegung der Hypothesen, welche dieses Paradoxon erklären, auf einen späteren Zeitpunkt.

**Verteilungen.** Korrelationen und Kovarianzen beschreiben ausreichend zufällige Abhängigkeiten, wenn die Stichproben der Variablen nach dem Gesetz der Gauss'schen Normalverteilung verteilt sind. Überprüfen wir nun, ob sich die Statistik des Paläoklimas hinreichend nahe an der Gauss'schen befindet. Mit diesem Ziel wurden Rangverteilungen entsprechend den Verteilungen der Stichproben der drei Variablen  $T$ ,  $[\text{CO}_2]$ ,  $[\text{CH}_4]$  erstellt. Mit ihrer Normierung ergeben sich integrale Verteilungen (Abb. 4). Sie wurden mit Polynomen 10-ter Ordnung approximiert und anschließend differenziert. Nach dieser Methode erweisen sich Aussagen anhand der abfallenden Ränder der Verteilungsgraphen als unzuverlässig. Die Lage der Maxima wird jedoch mit hinreichender Genauigkeit bestimmt.



**Abb. 4:** Normierte Verteilungsfunktionen der Temperatur (a), Kohlendioxid (b) und Methan (c)

(Abb. nach „Priroda“)



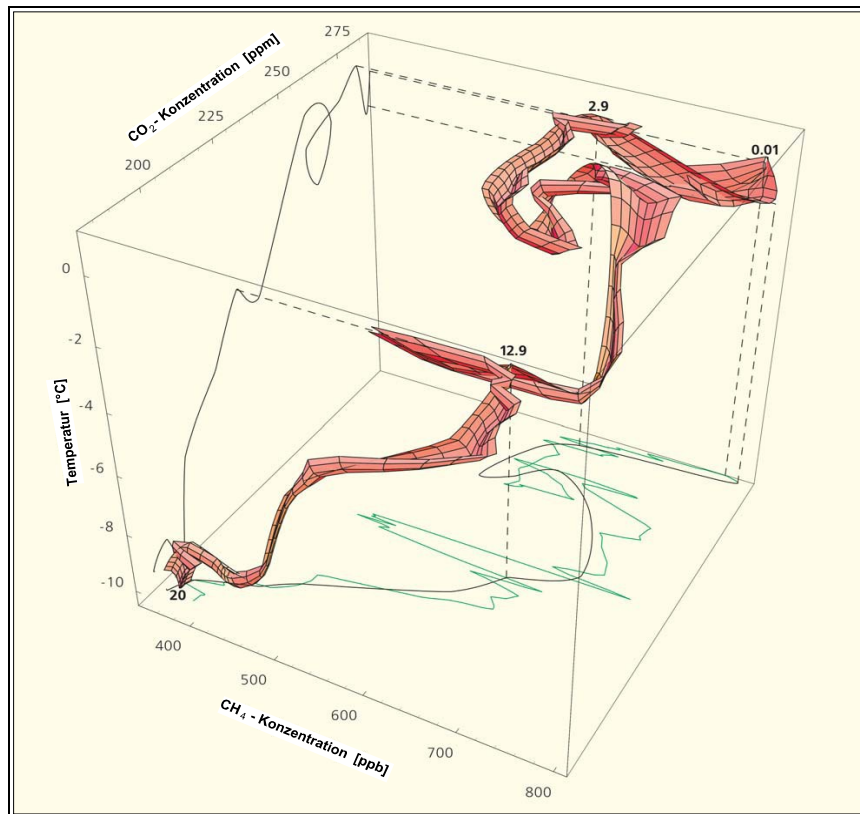
Entsprechend der normierten Verteilung der Temperaturen sind zwei Extremwerte bei entsprechend  $-7,8^{\circ}\text{C}$  und bei  $+3,7^{\circ}\text{C}$  auszuhalten. Auf der Seite der niedrigen Temperaturen befindet sich die Verteilung im Bereich der Grenztemperaturen, was sich logisch damit erklären lässt, dass die mittlere Jahrestemperatur nicht niedriger sein kann als die Strahlungstemperatur des Planeten. Noch beeindruckender (und nicht „gaussmäßig“) sieht die Verteilung der Kohlendioxidkonzentrationen aus. Hier bilden sich drei Maxima mit Konzentrationen bei 202, 236 und 278 ppm ab. Wir stellen fest, dass auch bei der Verteilung der Temperaturen ein „Bauch“ zwischen zwei Maxima vorhanden ist. Es sei daran erinnert, dass sich die Funktionen  $T(t)$  und  $[\text{CO}_2](t)$  untereinander als gut korreliert erweisen. Das spricht von einer möglichen Anwesenheit dreier verschiedener Mechanismen, die zu einer Dominanz der Temperaturen und der Konzentrationen von  $\text{CO}_2$  führen. Letztendlich erwiesen sich die Methankonzentrationen am dichtesten an der Normalverteilung (aber doch asymmetrisch) mit einem Maximum bei  $[\text{CH}_4] = 460$  ppb.

Ebenfalls wurden **Regressionen** berechnet. Weil jedoch erhebliche Abweichungen von der Normalverteilung festgestellt wurden, können die Größen der Regressionskoeffizienten nicht zuverlässig die realen Wechselbeziehungen widerspiegeln. Es wäre folgerichtig, die Regressionen separat entsprechend der Prozesse durchzuführen, welche zur Formierung der drei Maxima der Verteilungen führten.

Zieht man die Bilanz der standardmäßigen statistischen Analyse, so sind bereits vorläufige Schlussfolgerungen möglich. Ganz offensichtlich hängt der Zustand des Klimasystem der Erde gleichzeitig von einigen geologischen und biologischen Prozessen ab, deren Auswirkungen sich im Bereich niedriger und höherer Temperaturen prinzipiell voneinander unterscheiden. Am eigenartigsten stellt sich das Verhalten aller Variablen in Perioden schneller Anstiege, des Erreichens von Maximalwerten und des nachfolgenden Abfallens dar. Rätselhaft bleibt die Nichtvorhersagbarkeit derartiger Ausstöße. Um sich die Entwicklung der Ereignisse innerhalb solcher Zeitabschnitte besser vorstellen zu können, erstellen wir dreidimensionale Diagramme der Variablen  $\{T, [\text{CO}_2], [\text{CH}_4]\}$  separat für die jeweiligen Abschlusszyklen — den Übergang aus Kaltzeiten zu Interstadialen.

## Die kosmische Dryas

Beginnen wir mit der zu uns nächstgelegenen Eiszeit, die vor 20.000 Jahren endete und verfolgen, wie der Übergang zum rezenten Klima von statten ging. Abb. 5 zeigt eine dreidimensionale Projektion der Ereignisse, aus welcher ersichtlich ist, wie sich zeitlich die Konzentration der Treibhausgase und die Temperatur änderte. Man beachte den schroffen Bruch im Mittelteil der Grafik.



**Abb. 5:** Die Erwärmung im Holozän

(Der zeitliche Verlauf der Ereignisse lässt sich anhand der Zeitangaben an ausgewählten Punkten (in Tausend Jahren) innerhalb der Grafik bis 1950 verfolgen. Das ist ebenfalls anhand des gegliederten Grafikverlaufs (*rot*) möglich – jedes geradlinig begrenzte Körpersegment entspricht einer Zeit von 200 Jahren. Unter Berücksichtigung der Messfehler ist die  $\text{CO}_2$ -Konzentration und die Temperatur dargestellt; die Darstellung der  $\text{CH}_4$ -Konzentration basiert auf Daten aus dem Eis von Grönland und der Antarktis. Zum besseren Verständnis der dreidimensionalen Darstellung der Erwärmung erfolgte die Abbildung der Zusammenhänge  $\{T, [\text{CO}_2]\}$  und  $\{[\text{CO}_2], [\text{CH}_4]\}$ . Auf der unteren Fläche wird der Zusammenhang zwischen Methan und Kohlendioxid von Grönland mit grüner Linie gezeigt. (Abb. nach „Priroda“))

In der Geschichte der letzten Erwärmungsphase existiert ein besonderes Ereignis, welches sich vor 13.000 Jahren zutrug. Es wird als „Jüngere Dryas“ bezeichnet. In vorliegender Grafik bildet sie sich mit einem Temperaturrückgang und einem mächtigen Aufwärtstrend der Entwicklung der Grönländischen Methankonzentration ab. Schon lange ist bekannt, dass vor ca. 12.600 Jahren ein riesiger See, welcher sich mitten auf dem Gletscher gebildet hatte, auch einen großen Teil Nordamerikas bedeckte, schließlich den Gletscher durchbrach, sich schnell in den Atlantik ergoss und dabei den tiefen und breiten Mündungsbereich des St. Lorenz Stroms überspülte. Danach trat eine merkliche Abkühlung ein, die ca. 1000 Jahre andauerte, wonach sich wieder ein wärmeres Klima einstellte.

Unlängst wurde die Späte Dryas zusätzlich erklärt (noch nicht vollkommen zuverlässig). Diese Erklärung bzw. Hypothese basiert auf Ausgrabungsergebnissen [6], wonach vor 13 900 Jahren über Nordamerika ein Komet explodierte, dessen Masse die des Tunguska-Meteoriten um das 10-fache überstieg. Die Explosionsenergie verursachte einen kurzzeitigen aber großflächigen Brand auf dem mit Gras bewachsenen südlich des

Gletschers gelegenen Territorium. Die niedergegangene Brandasche führte zusammen mit dem Meteoritenstaub zum verstärkten Abtauen des Gletschers. Infolge der Explosion eines großen Meteoriten erfolgt eine Verschmutzung der Atmosphäre mit Staub, welcher aus der Troposphäre über Regen schnell ausgewaschen wird, sich aber in der Stratosphäre über mehrere Jahre hält. Analoge Erscheinungen lassen sich bei Vulkanausbrüchen beobachten, wenn die Ausstöße die Höhen der Stratosphäre erreichen. Dieser Staub streut die Albedo erhöhend das Sonnenlicht, womit eine kurzzeitige (2-3 Jahre) aber globale Abkühlung einhergeht. Auf das Erdklima hat sie jedoch kaum Einfluss zumindest in den Fällen, wenn eine Abkühlung nicht zu massenhaftem Absterben eines Teils des Biosystems führt.

Auf diese Weise bildete sich ein Gletschersee, welcher sich nach einer gewissen Zeit oberhalb der Salzwässer des Atlantiks ergoss. Für unsere Aufgaben ist die Möglichkeit wichtig, mit Hilfe dieses Ereignisses eine logische Erklärung für die nachfolgende Abkühlung zu finden. Das Süßwasser bedeckte im Norden in einen Teil des Atlantiks mit einer der Größenordnung nach 1 m mächtigen Schicht die warmen salzigen Wässer des Golfstroms. Das verhinderte ihre Abkühlung durch die polaren Winter und entzog ihnen folglich damit die Möglichkeit abzusinken. Wie bereits erklärt wurde, ruft eben diese Strömung kalter Wässer in die Tiefen des Ozeans eine relative Erwärmung auf der Nordhalbkugel hervor. Eben deshalb erfolgte innerhalb von ungefähr 1000 Jahren während der Jungen Dryas eine Abkühlung. Sie endete, als (durch Süßwasser) verdünnte Oberflächenwässer durch Winde vermischt wurden und teilweise zu Eis im nördlichen Ozean gefroren.

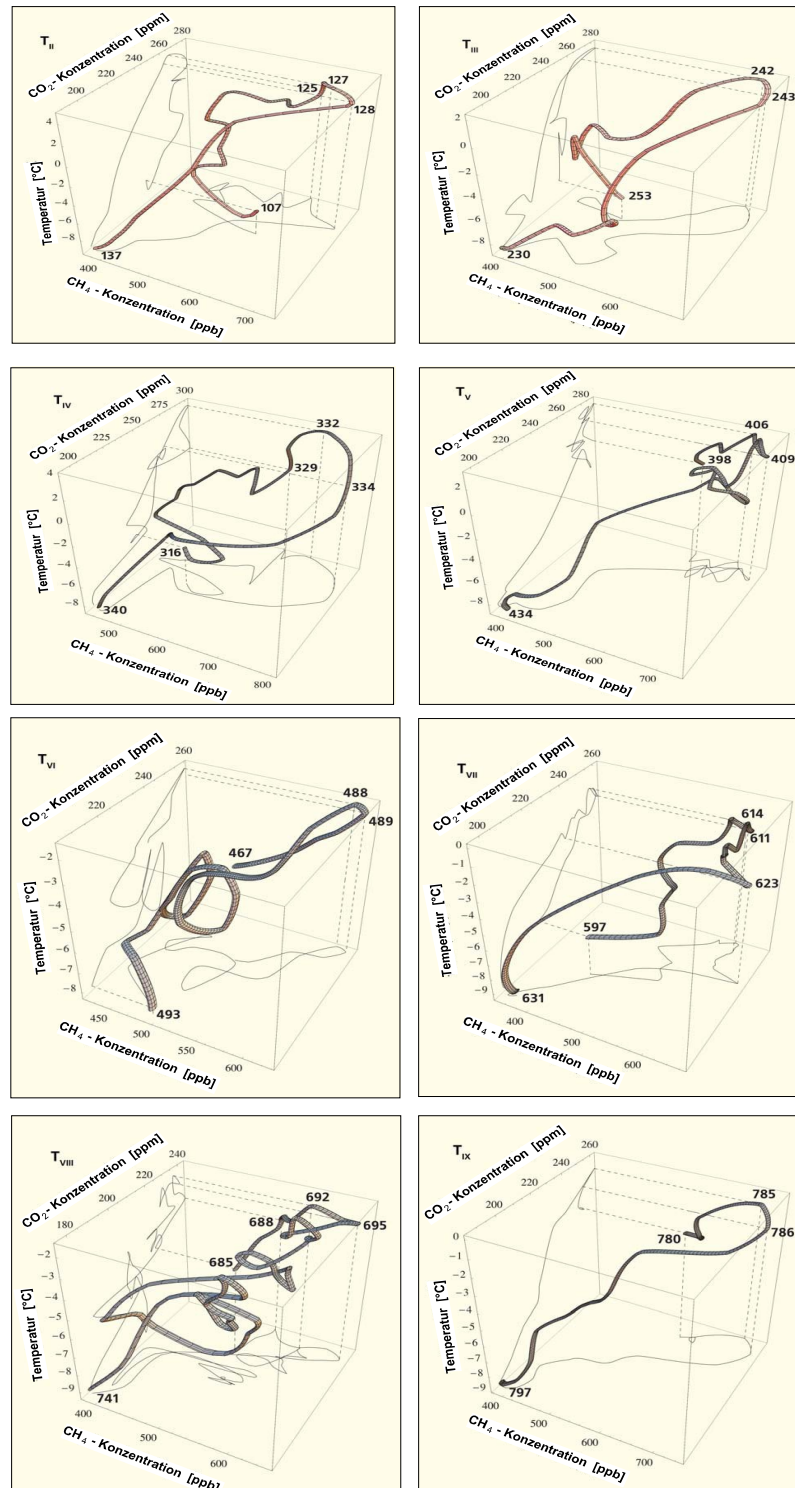
Schauen wir nun auf das verwunderliche Verhalten der Konzentration des Grönländischen Methans während der Jüngeren Dryas: Die schlagartige Verringerung seiner Konzentration zu Beginn der Jüngeren Dryas, ihr nicht weniger schlagartige Anstieg zu deren Ende. Vor allem muss auch erklärt werden, dass die Methankonzentrationen auf der Süd- und Nordhalbkugel ziemlich große Unterschiede aufweisen. Das liegt daran, dass für einen Konzentrationsausgleich ein Teil das Methans den Äquator überqueren muss. Jedoch geben die vom Äquator ausgehenden Monsune keine Möglichkeit zur Luftvermischung im unteren Bereich der Troposphäre. In höheren Regionen oxidiert Methan schnell unter dem Einfluss des ultravioletten Teils der Sonneneinstrahlung. Zu Beginn der Jüngeren Dryas blockierten mit Sauerstoff angereicherte Süßwässer aus dem auftauenden Gletscher den Austritt von Methan aus dem Ozean in die Atmosphäre.

Gerade innerhalb dieser Periode ist ein bisher nicht dagewesenes aktives Wachstum karbonatischer Ablagerungen in mittleren Tiefen des Atlantiks zu registrieren [7]. Mit dem Ende der Jüngeren Dryas hatte sich das Absinken abgekühlter salziger Wässer des Golfstroms wieder eingestellt, die Oberflächentemperatur stieg an und die Methankonzentration gelangte sprunghaft in die Fortsetzung früherer Abhängigkeit.

Insgesamt dauerte diese Abkühlungsepisode ungefähr 2000 Jahre an. Man kann sagen, dass sich dadurch die allgemeine Klimaerwärmung des Holozän zeitweise verlangsamte, aber nicht aufgehalten wurde.

## Der Klimawechsel am Ende von Kaltzeiten

Vergleichen wir untereinander dreidimensionale Grafiken neun globaler Erwärmungen der vergangenen 800.000 Jahre. Gemäß der üblichen geologischen Terminologie werden diese Phasen der Abschlusszyklen mit  $T_{I}-T_{IX}$  und entsprechend als ozeanische Isotopenstadien 1, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 bezeichnet. In Abb. 6 sind die allgemeinen Besonderheiten dieser Ereignisse festgehalten.



**Abb. 6:** Die Abschlusszyklen  $T_{II} - T_{IX}$ . (Die Bezeichnungen sind identisch mit Abb. 5, wobei hier die Dicke der Linien proportional zu den Messfehlern der Messgrößen ist. (Abb. nach „Priroda“))

Sie beginnen mit einem raschen Anstieg der Größen aller Variablen ( $T$ ,  $[\text{CO}_2]$  und  $[\text{CH}_4]$ ), ihre gemeinsamer Anstieg verläuft bis in den Bereich von 8.000 bis 20.000 Jahren. Als erste Variable erreicht die Methankonzentration ihr Maximum. Nach einigen tausend Jahren durchlaufen die Temperatur und die Kohlendioxidkonzentrationen ihre Maxima. Die zeitlichen Differenzen zwischen den Maxima sind (s. unten) in der Tabelle aufgeführt. In der Mehrheit sind diese Differenzen nicht sehr groß, einige sind gleich null. Negative Differenzen waren nicht festzustellen. Natürlich kann man für diese Feststellung keine volle Garantie geben, weil die Größe der Messfehler und der Fehler der Datenbearbeitung ca. 500 Jahre beträgt. Aber die angeführten Gesetzmäßigkeiten sind als statistisch gesichert anzusehen (s. Tabelle).

**Tab. 1:** Zeitdifferenzen des Eintritts von Maxima zwischen  $T$  und  $[\text{CH}_4]$  sowie  $T$  und  $[\text{CO}_2]$

Bezeichnung der Abschlusszyklen (Isotopenstadium)	Zeitdifferenzen [10 <sup>3</sup> a]	
	$\Delta t$ ( $[\text{CH}_4] - T$ )	$\Delta t$ ( $T - [\text{CO}_2]$ )
T <sub>II</sub> (1)	1	2
T <sub>III</sub> (5)	1	0
T <sub>IV</sub> (7)	2	3
T <sub>V</sub> (9)	3	0
T <sub>VI</sub> (11)	1	0
T <sub>VII</sub> (13)	9	3
T <sub>VIII</sub> (15)	3	4
T <sub>IX</sub> (17)	1	0
Durchschnitt	3,5	1,5

Auf diese Weise bestätigt eine detaillierte Untersuchung der Prozesse des Übergangs des Klimas von Kalt- zu Warmzeiten die Besonderheit, welche bereits bei der Analyse der Korrelationen festgestellt wurde: Die Entwicklung der Methankonzentration geht dem Anwachsen der Temperaturen voraus, die  $\text{CO}_2$ -Konzentration ist ihr etwas nachläufig. Der Umstand, dass  $[\text{CO}_2]$  mit seinem schnellen Anstieg  $[\text{CH}_4]$  folgt, lässt sich prinzipiell noch mit der Oxydation von Methan erklären, aber die Logik des Treibhauseffektes zöge ein Zurückbleiben der Temperatur bei Anwachsen der Treibhausgaskonzentration nach sich. Das Vorliegen eines Paradoxons ist offensichtlich.

Die Beendigung einer warmen Periode (Interstadial) erfolgt, so scheint es, etwas logischer: Hohe Temperaturen und hohe  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen stimulieren die Photosynthese sowie den Übergang von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Humus und das Torf der Moore. Einer Verringerung des Treibhauseffektes folgt die Absenkung der Oberflächentemperatur. Jedoch., wie später gezeigt wird, verlaufen die Finale von Warmzeiten nicht immer so glatt.

Welche Mechanismen können zu einer solchen Ereignisabfolge führen?

## Mechanismen der Klimaübergänge

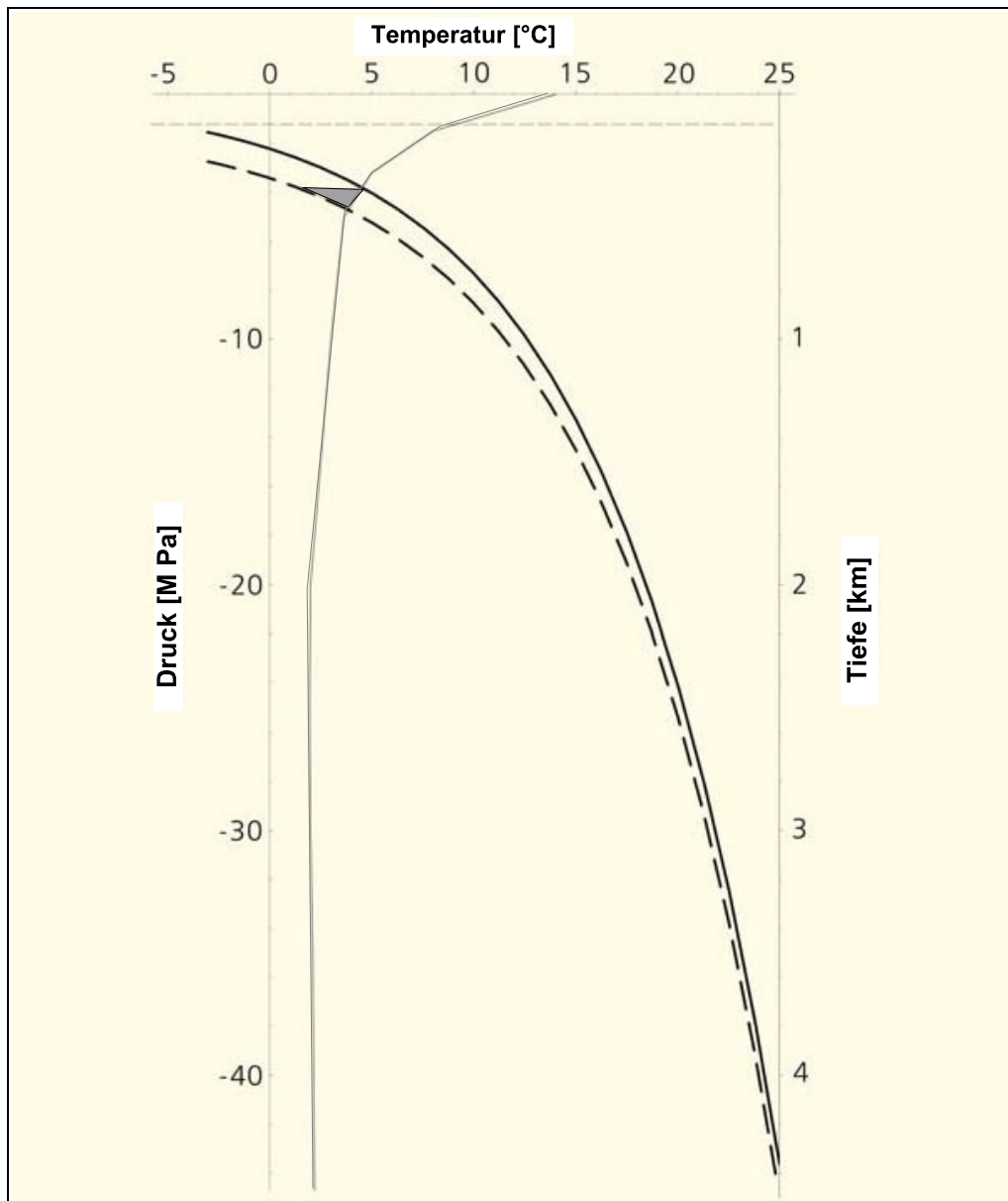
Lassen Sie uns mit der Beschreibung von Klimasystemen zum Zeitpunkt maximaler Vereisungen beginnen, Zeitpunkte die den Anfangszuständen aus den Abb. 5 und 6 (linke untere Seite der Grafiken) vorausgehen. Zu dieser Zeit sank der Meeresspiegel um 100 bis 120 m aufgrund der massenhaften Eisbildung auf dem Festland. Die mittlere Salinität wuchs um 3 bis 5% gegenüber der heutigen auf 3 bis 6% an. Bei niedrigen Temperaturen auf der Festlands Oberfläche war auch die Geschwindigkeit der Verdunstung zweifach geringer als heute. Auf das Festland ging wenig Regen und Schnee nieder. Außerdem akkumulierten sich die Niederschläge in den Gletschern. Der oberflächliche Abfluss vom Festland in die Meere über die Flusssysteme war ebenfalls bedeutend geringer als heute. Das gesamte System der Konvektion der Atmosphäre wie auch der Ozeane war während der Kaltzeiten weniger intensiv als heute – man kann auch sagen sehr träge.

Der Wärmestrom aus dem Erdinneren ist im Vergleich zur Leistung der auf die Erdoberfläche eingehenden Sonneneinstrahlung der Größe  $W_0(1 - A) \sim 10^3 \text{ W/m}^2$  vernachlässigbar gering. Diesen Energiestrom leitet jedoch die Atmosphäre von der Erdoberfläche über die Abstrahlung in den Kosmos schnell ab, wobei der Ozeanboden von der Oberfläche weit entfernt ist. Deshalb kann man eben doch nicht bei der Untersuchung der Dynamik der Ozeane den Wärmestrom aus dem Erdinneren über den Ozeanboden vernachlässigen. Dieser beträgt im Mittel  $W_1 = 0,1 \text{ W/m}^2$  [8] und änderte sich nicht innerhalb den letzten Dutzenden Mill. Jahre. Bewerten wir nun, in welcher Zeit ein solcher Energiefluss den gesamten Weltozean (mittlere Tiefe  $H = 3730 \text{ m}$ ) um, nehmen wir an,  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  erwärmen würde. Die Bewertung ergibt:  $\Delta t_1 = c\rho H\Delta T/W_1$  (wobei  $c$  die Wärmekapazität und  $\rho$  die Dichte des Wassers ist). Die Antwort lautet 5.000 Jahre - nicht viel im Vergleich zur Dauer von Kaltzeiten. Dies bedeutet, dass eine Verringerung des Abflusses kalter Wässer in die Tiefe der Ozeane fähig ist, kardinale Veränderungen seiner Struktur hervorzurufen: Die Ozeanwässer können sich hinreichend schnell erwärmen durch die Wärme aus dem Erdinneren ob nun flächendeckend oder auch lokal. Das Wesen der Grundlage der Hypothese des Artikels besteht darin, dass dies eben auch so war. Untersuchungen der Paläotemperaturen der Tiefenwässer der Ozeane [5] zeigen, dass innerhalb der vergangenen 900.000 Jahre ihre Erwärmung die auf dem Festland um 11.000±5.000 Jahre überstieg.

Der Druckabfall in den Ozeanen aufgrund der Absenkung ihres Wasserspiegels sowie das gleichzeitige Anwachsen der Wassertemperatur führt zu einer Störung des Gleichgewichtes der festen Gashydrate (Abb. 7). Zum jetzigen Zeitpunkt führt der Austrag von Methan aus Ablagerungen des Meeresbodens zu seiner Lösung im Wasser, wonach es oxidiert wird, so dass am Meeresboden ausgetretenes Methan so gut wie nicht an die Oberfläche gelangt. Jedoch im trägen Ozean der Kaltzeiten hätte ein schnelles Aufwärmen den Aufstieg eines Stromes vieler Methanbläschen auslösen können. Hinzu kommt, dass ein solches „Aufkochen“ schnell zu einem Aufkonzentrieren der Atmosphäre mit Methan und auch zu einer Mitnahme erwärmter Tiefenwässer an die Oberfläche führte. Jedes Kilogramm Methan, welches aus dem Gashydrat in die Atmosphäre übergeht, zieht ca. 1400 kg meeresbodennaher Wässer mit sich an die Oberfläche. Zusammen mit der gleichzeitigen kompensierenden Absenkung kälterer Oberflächenwässer in anderen Ozeangebieten wäre eine massenhafte Ausgasung von Methan fähig, zu einer sprunghaften globalen Erwärmung zu führen. Während der Kaltzeiten nahm der Ozean über seine kalte Oberfläche verstärkt Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf.



Deshalb reichert sich die Atmosphäre im Falle eines blasenartigen Methanaustritts sofort mit allen Treibhausgasen an.



**Рис. 7.** Die Gleichgewichtskurve von in Wasser gelöstem Methan und Methanhydrat (*fette Linie*) und die typische Abhängigkeit der Temperatur von der Tiefe (*dünne Linie*). Innerhalb von Kaltzeiten (das Meeresniveau und die Gleichgewichtskurve sind mit *gepunkteter Linie* dargestellt) werden die Ablagerungen mit Methanhydrat instabil (*graues Dreieck*) (Abb. nach „Priroda“)

Eine derartige Konzeption erklärt die beobachtete Abfolge von Maxima für die Abschlusszyklen  $T_I$ — $T_{IX}$ : Und tatsächlich, nach der Methankonzentration steigt die Temperatur an, zuletzt ergibt sich ein Maximalwert für die Kohlendioxidkonzentration. Die Methankonzentration sinkt schnell nach dem Einstellen seines Maximums: Erstens deshalb, weil im Zuge des Auftauens der Gletscher der Meeresspiegel ansteigt, es steigt der Druck, womit der Zerfall von Methanhydrat gestoppt wird; zweitens wird Methan in der Atmosphäre zu  $CO_2$  oxidiert. Aber wodurch wird das schnelle Absinken nach Erreichen der Maxima (zeitnahen) der Temperatur

und der Kohlendioxidkonzentration hervorgerufen? Offensichtlich erfolgte bei ihren Maximalwerten (2 – 4°C und 280 – 300 ppm) ein schnelles Anwachsen der Biomasse im Ozean, wodurch ein Teil des CO<sub>2</sub> verbraucht und damit der Treibhauseffekt abgesenkt wurde. Aber warum dies im Ozean und nicht auf dem Festland?

Kehren wir zu Abb. 4 zurück. Wie bereits angemerkt, die Häufigkeitsverteilung der Kohlendioxidkonzentrationen zeigt drei Maxima (bzw. Extremwerte) (im Fall der Temperatur sind es „zweieinhalb“): zwei größere Maxima mit niedrigen Konzentration und ein kleinerer bei höherer Konzentration. Die beiden ersten Extremwerte entsprechen offensichtlich den Übergängen aus der Kaltzeit. Der weitere Extremwert der Verteilung von [CO<sub>2</sub>] und der „Bauch“ der Temperaturverteilung entsprechen einem oberen Zustand bei sich oft wiederholenden Schwankungen zwischen kalten Perioden und solcher mit gemäßigten Erwärmungen (man beachte die zweieinhalb-fache Rotation beim Abschlusszyklus T<sub>VI</sub>; beim Übergang in Kaltzeiten häufen sich solche Momente). Die einzige schlüssige Erklärung für das gleichzeitige Auftreten von Maximalwerten der Temperatur und [CO<sub>2</sub>] ist folgende: Auf dem Festland erfolgt ein massenhaftes Abbrennen von Torf und Holz, dabei kann das gesamte entstandene Kohlendioxid nicht sofort vom Meerwasser aufgenommen werden. Dieser Prozess muss nicht unbedingt mit einem Brand zusammenhängen – möglich sind auch beispielsweise bakterielle Zersetzung, schnelle Fäulnis usw. Die Zersetzungsprodukte werden über Niederschläge ins Meer gespült, wo sofort ein „Aufblühen“ der Biomasse erfolgt.

Offensichtlich zwingt sich dem Leser schon die Frage auf, in wie weit heute die Milanković-Theorie noch am Hintergrund der Zusätze gültig ist. Die Antwort ist, dass sie statistisch war ist, das Klima wirklich innerhalb von Zeiträumen über ca. 41 bis 100.000 Jahre variiert. Aber der Mechanismus des planetarischen Einflusses auf das Klima ist wahrscheinlich ein anderer. Der Jupiter, die Venus stören den Orbit der Erde, ändern ihre Exzentrizität. Es gibt aber noch einen anderen Himmelskörper, welcher auf das Klima einwirkt – der Mond. Möglicherweise war sich auch schon Milanković bewusst, dass man den Mond auch berücksichtigen muss. Aber im Unterschied zur Bewegung der Planeten, welche er mittels Berechnungen über Millionen von Jahren zurückverfolgen konnte, lässt sich die Mondbahn über einen nur weitaus kleineren Zeitraum rekonstruieren.

Der Einfluss des Mondes auf irdische Prozesse ist sehr bedeutend. Man kann allein damit beginnen, dass die Präzession der Erdachse zur Hälfte durch den Mond bedingt ist. Die Chandlerbewegung der Erdachse befindet sich in Resonanz mit den Schwankungen der Exzentrizität der Mondbahn. Die Statistik belegt den Einfluss unseres Begleiters auf Oszillationen des Typs El Niño und auch direkt auf das Wetter [9]. Innerhalb der Perioden, wenn unter dem Einfluss interplanetarer Störungen sich die Exzentrizität der Erdbahn verstärkt, vergrößern sich gleichzeitig die Exzentrizität der Mondbahn und die Neigung seiner Rotationsachse. Wenn heute die Bewegung des Mondes sich auf das Wetter auswirkt, so kann eine größere Exzentrizität auf Dauer auch ein Auslöser für die Umkehr der Gezeitenbewegung sein. Eine derartige Wechselwirkung zwischen dem Mond und dem irdischen Ozeanen würde auch die planetarische Störung vergrößern, welche Milanković berücksichtigte. Ein Beweis für die Richtigkeit der geäußerten Überlegungen erfordert natürlich eingehende weitere Untersuchungen.

## Was hält für uns das bevorstehende Jahrhundert bereit?

Die Klimageschichte ist lehrreich, bietet uns aber leider keine schwerwiegenden Gründe für eine zuverlässige Voraussage des Klimas sogar für die nähere Zukunft. Innerhalb der letzten Millionen Jahre befand sich die Atmosphäre niemals in einem dem heute ähnlichen Zustand. Niemals wurde eine derartig hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration wie heute beobachtet, welche sich innerhalb der letzten 100 Jahre im Resultat der Entwicklung der Energetik herausbildete. Der Treibhauseffekt wird sich auch noch in 20 Jahren weiter verstärken aufgrund der Trägheit der Wirtschaft, welche weiter fossile Brennstoffe nutzt wird. Die Klimaerwärmung wird sich fortsetzen und die nächste Generation wird beispielsweise das Nordpolarmeer eisfrei sehen. Ob seine Erwärmung ein massenhaftes Freisetzen von Methan aus den Hydraten der Ablagerungen an seinem Boden hervorrufen wird, ist nicht bekannt. Klimaprognosen für Zeiten außerhalb der nächsten 40-50 Jahre anzustellen, würde sich wahrscheinlich nicht lohnen. Ein weiterer unverminderter Anstieg der Kohlendioxidkonzentration gibt dem Ozean keine Möglichkeit, schnell einen Gleichgewichtszustand zu erlangen. Die Besonderheit des aktuellen Zustandes liegt darin, dass die Instabilität des Klimas schneller wächst als die Erwärmung. Vom vorindustriellen Zeitalter aus gesehen, stieg die Temperatur an der Erdoberfläche weniger als um ein Grad an, aber die Häufigkeit von Hurrikans, Überschwemmungen und Bränden wuchs um das Zweifache an. In welchem Zustand sich das Klima nach Erreichen eines Gleichgewichts der Ozeane befinden wird, ist schwer vorauszusagen.

## Literatur:

1. *Milankovitch M.* Kanon der Erdbestrahlungen und Seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Belgrade, 1941 (Canon of Insolation and the Ice Age Problem. Alven Global, 1998).
2. HITRAN (High Resolution Transmission) — Datenbasis des Harvard-Smitson-Instituts ([www.cfa.harvard.edu/hitran](http://www.cfa.harvard.edu/hitran)). USA.
3. *Lilthi D. et al.* High-Resolution Carbon Dioxide Concentration Record 650.000–800.000 Years Before Present // *Nature*. 2008. V.453. P.379–382.
4. *Loulergue L. et al.* Orbital and Millennial-Scale Features of Atmospheric CH<sub>4</sub> Over the Past 800.000 Years // *Nature*. 2008. V.453. P.383–386.
5. *Sosdian S., Rosenthal Y.* Deep-Sea Temperature and Ice Volume Changes Across the Pliocene-Pleistocene Climate Transition // *Science*. 2009. V.325. P.306–309. (s. in dieser Nr.: Kohlendioxid in der Atmosphäre des frühen Pleistozän, S. 78)
6. *Kennett D.J. et al.* Nanodiamonds in the Younger Dryas Boundary Sediment Layer // *Science*. 2009. V.323. P.94. (s. in dieser Nr.: Hat die Mammute ein Komet vernichtet?, S.82)
7. *Lein, A. Ju., Iwanow, M. W.* Die Methanzyklen im Ozean. Moskau., 2009. [russ.]
8. *Hofmeister A. M., Criss R. E.* Earth's Heat Flux Revised and Linked to Chemistry // *Tectonophysics*. 2005. V.395. P.159–177.
9. *Sidorenkow, N. S.* Die Natur der Instabilitäten der Erdrotation // *Priroda*. 2004. №8. S.8–18. [russ.]