

## El cambio climático y la glaciación de la Tierra

V.M. Kotlyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Presidente Honorario de la Sociedad Geográfica Rusa, Russian Geographical Society, Novaya Ploshchad, 10, bld. 2, Moscow, 109012, Russian Federation.*

*vladkot4@gmail.com*

**RESUMEN:** La época actual del cambio climático ha empezado a mediados del siglo 19, sin embargo durante la última década el calentamiento global se ha ralentizado. El factor principal del calentamiento es la ciclicidad natural de procesos en la Tierra, aunque la influencia antrópica también influye. Al mismo tiempo, a escala geológica la Tierra actualmente se encuentra en el ciclo "frío" de su historia, y ahora está experimentando el enfriamiento del Holoceno que conllevará dentro de 1-2 miles de años a una nueva época glacial. El calentamiento global actual tiene como consecuencia la degradación de glaciares de las regiones árticas y de montaña, sin embargo el principal cuerpo de hielo en la Tierra, situado en la Antártica Oriental, no solamente no está disminuyendo, si no posiblemente está creciendo. Para estudiar la historia natural de la Tierra durante el Cuaternario, en las décadas 1970-1990 los científicos perforaron un agujero, de más de 3,5 km de profundidad, en la estación rusa Vostok en la Antártica Central, y extrajeron un núcleo de esta perforación. Un análisis complejo del tronco (contenido oxígeno-isotópico, composición del aire atmosférico preservado en burbujas dentro del hielo antiguo, y muchos otros análisis) han posibilitado un estudio de los cambios medioambientales a lo largo de los últimos 440 miles de años, en las cuales cuatro ciclos climáticos han sucedido en la Tierra. El análisis del ciclo Interglacial presente, realizado a partir de los datos obtenidos del núcleo, ha demostrado que el ciclo Interglacial está ocurriendo de misma manera que la fase marina MIS-11 que tuvo lugar hace 400 miles de años.

**Palabras-clave:** calentamiento global; degradación de glaciares; historia glacial de la Tierra; posible crecimiento de la Placa Glacial de la Antártica Oriental.

En los últimos años, nuestro planeta está pasando por una época de calentamiento global. Esta época comenzó hace unos 150 años después de así llamada "Pequeña Edad de Hielo", es decir el período de enfriamiento del clima que alcanzó su punto máximo a mediados del siglo XIX. El aumento de la temperatura global del aire en 100 años fue un poco más de 0,7 ° C, y en los últimos 30 años del siglo XX el crecimiento de la temperatura se ha aumentado, sobre todo fuertemente en las regiones continentales de Eurasia y América del Norte, y al máximo – en el Ártico. Sin embargo, a principios del siglo XXI el calentamiento se ha ralentizado. El principal factor del calentamiento moderno es el carácter cíclico de los procesos naturales, mientras que la influencia antropogénica también tiene lugar.

Teniendo en cuenta la escala geológica de tiempo (es decir, la historia de nuestro planeta durante 500 millones de años), hay que destacar que actualmente la Tierra se encuentra en el ciclo frío de su existencia, y en los últimos 5-6 mil años se produce el enfriamiento global que en 1–2 mil años dará lugar a una nueva edad de hielo cuando en todo el mundo resurgirían las capas de hielo (casquetes glaciares).

En la actualidad también se registra la elevación del nivel del mar. Las reconstrucciones del nivel del mar a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, las mediciones costeras del nivel del mar y, por último, la altimetría por satélite indican la elevación anual del nivel del mar equivalente a 1,7 milímetros en el siglo XX. Sin embargo, en las últimas décadas la elevación del nivel del mar se aumentó y alcanzó la cifra de 3 mm al año. Las causas de esta elevación del nivel del mar está claramente asociada con el aumento de la temperatura global, que, por un lado, provoca la expansión de la capa superficial del océano que está calentando, por otro lado es causada por el derretimiento de los glaciares y de ese modo por el aumento del volumen del agua en el océano.

La explicación de este calentamiento buscan en la influencia humana sobre el clima global, sobre todo en el impacto de los gases de efecto invernadero sobre el crecimiento de la temperatura. Para lo cual se

utilizan varios modelos climáticos. Sin embargo, una simple comparación muestra que el curso de la temperatura global es mucho más difícil en comparación, por ejemplo, con el aumento del consumo mundial de combustible. Es evidente que todavía estamos lejos de comprender todos los procesos naturales que determinan el funcionamiento del complejo sistema terrestre y que deben ser la base para el modelado de los cambios climáticos pasados y futuros.

En el cambio de la temperatura terrestre es evidente la enorme influencia que ejerce el flujo de la energía solar. Para todo el período de tiempo analizado, vemos cambios muy similares en el flujo de la energía solar y anomalías medias anuales de temperatura del aire en el territorio al norte de 62° N, mientras que una correlación directa con el contenido de dióxido de carbono no se puede detectar. Estos datos indican que la contribución de la energía solar a la dispersión de la temperatura del aire puede ser un 83,5%, mientras que el aporte de dióxido de carbono es sólo un 2,4%.

Entre las amenazas del calentamiento global en este siglo se puede mencionar: la fusión intensa de la capa de nieve, el derretimiento del hielo marino y los glaciares, elevación del nivel del mar y la inundación de las tierras bajas, aumento de la escorrentía de los ríos y las inundaciones, la descongelación y destrucción del permafrost (suelo permanentemente helado), el desplazamiento hacia los polos de las zonas naturales latitudinales y del límite de bosque (límite de árboles), el cambio en las condiciones de existencia de biota, y por fin, como el resultado de muchos procesos naturales - el deterioro de las condiciones de vida de la población.

El calentamiento que está ocurriendo afecta gravemente el estado de casco de hielo marino en el Océano Glacial Ártico. Hasta hace poco tiempo los hielos marinos dificultaban mucho la navegación por la Ruta marítima del Norte (también conocida como Paso del Noreste), mientras que el Paso del Noroeste en el Archipiélago Ártico Canadiense era prácticamente intransitable. Actualmente los hielos que tienen el índice de continuidad de más de 7 puntos se encuentran sólo en la región cerca al polo y en el norte del Archipiélago Ártico Canadiense. El área total del manto de hielo ártico durante los últimos 20 años se disminuía constantemente.

Se ha registrado la reducción de la superficie de hielo permanente en el Ártico en los últimos 10–15 años aproximadamente un 40%. Según los datos de la altimetría láser de satélite, a partir del año 2004 el espesor medio del hielo marino en el mes de octubre se ha reducido de 2 a 1,4 m, su área se ha disminuido en un 26%, mientras que el volumen del hielo se ha reducido en un 50%.

Hablando sobre la distribución global de la temperatura del aire en la superficie de la Tierra, yo muestro el curso de desviaciones en cambios anuales zonales de temperatura media del aire en todas las latitudes en relación con el período 1951–1980. Es evidente que los cambios visibles ocurren en todas partes, incluyendo los períodos intraseculares de enfriamiento en los años 1910–1920 y 1960–1970 del siglo pasado. El origen de enfriamiento obviamente está relacionado con los procesos naturales cíclicos y sobre todo con el ciclo integral de 60 años de duración. También se observa que el calentamiento actual es más pronunciado en la región del Ártico.

Los glaciares del Ártico de Rusia en los últimos 50 años se han reducido como mínimo a 725 km<sup>2</sup>, los glaciares en la Tierra de Francisco José se han reducido a 375 km<sup>2</sup>, en la Nueva Tierra a 284 km<sup>2</sup> y en la Tierra del Norte a 65 km<sup>2</sup>. Esto es equivalente a la pérdida de toda la superficie de glaciación en un 1,3%. Estimaciones del balance realizadas para los glaciares de la Tierra de Francisco José muestran que el espesor del hielo durante el medio siglo se ha disminuido en un promedio de 10 m.

Es natural que el calentamiento global se refleje fuertemente en el estado de los glaciares y los lleva a su retroceso. Pero este proceso se produjo en la Tierra varias veces, y luego dio paso al período más frío, como ocurrió muy recientemente, en los años 60 y 70 del siglo pasado. Y no hay ninguna razón para creer que el calentamiento actual continuaría indefinidamente largo tiempo y iría a crecer. No tenemos ninguna base científica seria para esta afirmación.

Toda la moderna forma de vida humana en el mundo (infraestructura, la economía, la agricultura) es tal que cualquier cambio climático (calentamiento global o regional, enfriamiento, humidificación, sequías, etc.) puede ser desfavorable para el hombre, porque el moderno modo de vida se formó y se ha desarrollado rápidamente en un período muy limitado de tiempo, es decir en el último siglo, y por lo tanto, está adaptado sólo a un ámbito geográfico muy específico.

La sociedad humana, por supuesto, tiene que trazar sus planes de vida, incluso los planes económicos, teniendo en cuenta el calentamiento que está ocurriendo. Al mismo tiempo la gente debe estar lista para otros cambios climáticos, ya que el sistema de la Tierra sigue viviendo de acuerdo con sus propios leyes naturales, los cuales el impacto antrópico de la actividad humana todavía no puede destruir.

El actual calentamiento global provoca la degradación de hielo marino en el Ártico y los glaciares en las zonas de montaña. Sin embargo la masa principal de hielo en el mundo – ubicado en la región oriental de la Antártida – no se reduce, y posiblemente incluso esté en crecimiento. Para estudiar la historia de la naturaleza de la Tierra en los años 1970–1990-s en el territorio en la estación rusa Vostok en la Antártida central fue realizada la perforación del pozo con la profundidad de más de 3,5 km, del cual fue conseguido el testigo cilíndrico de hielo. El análisis integrado del testigo (el análisis de isótopos de oxígeno, el estudio de la composición de la atmósfera conservado en burbujas dentro del hielo antiguo y otros) ha permitido estudiar los cambios de medio ambiente por 440 mil años durante los cuales la Tierra tenía cuatro ciclos climáticos (Fig. 1).

Todo el conjunto de datos recibidos del testigo de hielo sacado del pozo perforado en la estación Vostok indica que a lo largo de los últimos 420 mil años el clima experimentaba fluctuaciones periódicas, la amplitud de las cuales no fue mayor que los límites estables de la variabilidad del clima (Lipenkov, 2006; Kotlyakov et al., 2013; Petit et al., 2013; Kotlyakov, 2015). En el pasado la concentración de gases de efecto invernadero y las temperaturas globales se han cambiado en paralelo, pero el contenido de gases invernadero se ha incrementado dramáticamente en los últimos 100 años, mientras que los cambios de temperatura no iban más allá de sus fluctuaciones naturales. Por último, el Holoceno que dura ya por aproximadamente 11 mil años resulta mucho más largo que los tres períodos interglaciales anteriores, y según muchos índices, en el futuro próximo geológico se cambiaría por una nueva época glacial. También es importante tener en cuenta que el nivel del óptimo climático del Holoceno es 1,5 °C – más bajo que la temperatura máxima del período interglacial anterior, cuando, por supuesto, no había ninguna influencia humana sobre la Tierra. El análisis del período interglacial actual, hecho a base de los datos del estudio del testigo de hielo desde el pozo perforado en la estación Vostok, reveló que se está desarrollando semejante al estadio marino 400 mil años atrás.

En 1960-1970 los científicos rusos descubrieron un enorme lago subglacial en el área de la estación Vostok situada en el interior del continente (Zotikov, 1963). El lago recibió también el nombre Vostok (Oriente). Por la cantidad de agua dulce en el lago es el quinto más grande en el mundo y representa un objeto único para la investigación. El pozo de perforación en la estación Vostok pasó todo el espesor de hielo, más de 3.500 metros, y hace tres años por primera vez en el mundo se metió en el lago subglacial (Lorius et al., 1985; Jouzel et al., 1993; Kapitsa et al., 1996; Petit et al., 1999). Esto es un logro geográfico notable y excepcional de nuestra era.

Lo más probable que el lago subglacial fue aislado del medio ambiente exterior durante varios millones de años. Los cálculos muestran que las condiciones térmicas en diferentes partes del lago no son iguales, esto provoca corrientes internos y el intercambio activo de energía. El hielo derritiendo en el techo superior del lago está suministrando constantemente el aire atmosférico atrapado en el hielo hace cientos de miles y millones de años. En estas condiciones puede vivir microfauna y microflora en el lago que es de interés científico excepcional.

El lago obviamente está sobresaturado de oxígeno, ya que encima del lago se derrite el glaciar que lo alimenta con el aire conservado en el hielo. Pero el hielo del lago que se congela lentamente no contiene gas, y por lo tanto el oxígeno se almacena en el lago. Según los cálculos, en el lago Vostok podría ser desuelto hasta 0,7 a 1,3 gramos de oxígeno por litro de agua, y se sabe que las bacterias conocidas hoy no pueden existir en tales condiciones. La ciencia todavía no conoce bacterias-oxigenofilas, porque este grupo de organismos había aparecido en la época cuando el oxígeno en la Tierra no ya existía (Fig. 1).

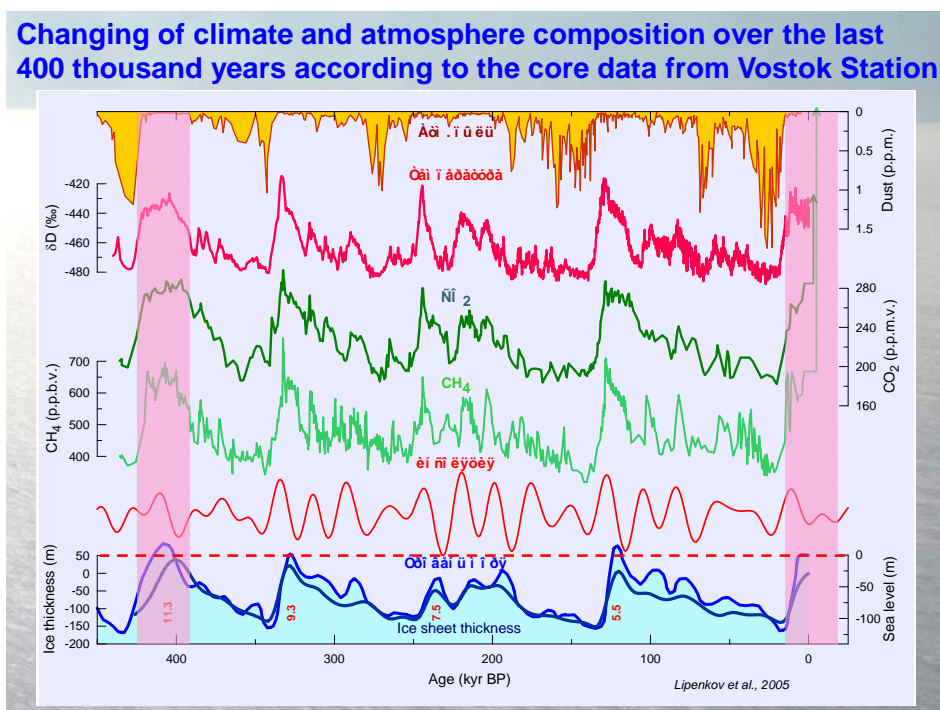
El hallazgo de bacterias-oxigenofilas en el lago subglacial puede ser el descubrimiento muy importante en el campo de la astrobiología – la búsqueda de vida en otros planetas. Hoy día muchos científicos creen que uno de los satélites de Júpiter (Europa) bajo una gruesa capa de hielo puede tener el océano con las condiciones tal vez favorables para el origen de la vida. Es posible que el descubrimiento de la vida orgánica en el lago Vostok ayudará a explorar la posibilidad de vida en otros planetas del sistema Solar (Kotlyakov et al., 2013; Petit et al., 2013; Kotlyakov, 2015).

## **BIBLIOGRAFÍA (en orden cronológico)<sup>1</sup>**

Zotikov I.A. (1963): “Bottom melting in the central zone of the ice shield on the Antarctic continent and its influence upon the present balance of the ice mass”. Intern. Assoc. Scient. Hydrology, 1, 36–44.

---

<sup>1</sup>La bibliografía se cita en el orden cronológico dado que nuestra comunicación presenta los resultados de múltiples proyectos de investigación que se han llevado a cabo por varios equipos internacionales, en los que hemos participado.



**Figura 1.** Cambios en la composición climática y atmosférica durante los últimos 400.000 años según los datos del núcleo de la estación Vostok. Fuente: Kotlyakov et al. (2013).

- Lorius C., Jouzel J., Ritz C., Merlivat L., Barkov N.I., Korotkevich Y.S., Kotlyakov V.M. (1985): "A 150,000-year climatic record from Antarctic ice". *Nature*, 316 (6029), 591–596.
- Jouzel J., Barkov N.I., Barnola J.M., Bender M., Chappellaz J., Genthon C., Kotlyakov V.M., Lipenkov V., Lorius C., Petit J.R., Raynaud D., Raisbeck G., Ritz C., Sovers T., Stievenard M., Yiou F., Yiou P. (1993): "Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period". *Nature*, 364 (6436), 407–412.
- Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G. de Q., Siegert M.J., Zotikov I.A. (1996): "A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica". *Nature*, 381 (6584), 684–686.
- Petit J.R., Basile I., Leruyet A., Raynaud D., Lorius C., Jouzel J., Stievenard M., Lipenkov V.Y., Barkov N.I., Kudryashov B.B., Davis M., Salzman E., Kotlyakov V.M. (1997): "Four climate cycles in Vostok ice core". *Nature*, 387, 359–360.
- Petit J.P., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Salzman E., Stievenard M. (1999): "Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica". *Nature*, 399, 429–436.
- Lipenkov V.Ya. (on behalf of the Vostok project members) (2006): "Vostok ice core project". *PAGES News*, 1.
- Kotlyakov V.M., Lipenkov V.Ya., Vasiliev N.I. (2013): "Deep drilling in Central Antarctica and penetration into the subglacial Lake Vostok". *Vestnik Rossiyskoi Akademii Nauk*, 83 (7), 591–605.
- Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barnola J.M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davis M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pépin L., Ritz C., Salzman E., Stievenard M. (2013): "Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica". En: AA.VV.: *The Future of Nature: Documents of Global Change*, 348–356.
- Kotlyakov V.M. (2015): "Results of thirty years of glaciological studies of the deep borehole at the Russian station Vostok in Antarctica". *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*. Bd. 47/48 (2013/14), 3–16.