

אלון אנגרט

המכון למדעי כדור הארץ,
האוניברסיטה העברית בירושלים

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

אנגרט א. 2011. ההתחממות
הגלובלית – העובדות המדעיות
במבט היסטורי. *אקולוגיה וסביבה*
2(3): 174–182.



ההתחממות הגלובלית – העובדות המדעיות במבט היסטורי

7 באוגוסט, 2011

גיליון סתיו 2011 / כרך 2(3)

סקירות

תקציר

מדעני האקלים נמצאים תחת התקפות בקשר להשפעת פעילות אנושית על התחממות כדור הארץ. התקפות אלה גורמות לבלבול בציבור הרחב ובקרב מדענים. בסקירה זו מוצגים גילויים היסטוריים של עובדות מפתח שההבנה המדעית בתחום מבוססת עליהן. מסקנה עיקרית שנובעת מהבנה זו היא שהעלייה בריכוז האטמוספרי של גזי חממה, כתוצאה מפעילות האדם, גורמת להתחממות מהירה ולשינויים באקלים. בין גילויים היסטוריים אלה נמנים הגילוי מהמאה ה-19 ש- CO_2 הוא גז חממה, גילויים משנות ה-50 שמצאו "טביעת אצבע" אנושית בחותמת האיזוטופית של CO_2 באטמוספירה, העלייה המהירה שנמדדה החל משנות ה-60 בריכוז האטמוספרי של גז זה, והקשר ההדוק בין תקופות קרח לריכוזים נמוכים שלו. בסקירה מוגדר המונח "רגישות אקלימית", שעיקר הדיון המדעי בנושא כיום קשור לאומדנים של ערכו. עם זאת, אני מראה כי באופן מעשי, האומדנים השונים נבדלים רק לגבי העשור המדויק במאה הנוכחית שההתחממות תעבור בו את הסף של 2 מעלות צלזיוס.

הקדמה

המחקר המדעי על התחממות כדור הארץ כתוצאה מפליטה אנושית של גזי חממה מעורר מספר רב של התקפות פוליטיות בדומה להתקפות על מחקרי האבולוציה. בארה"ב אפשר לציין בין השאר הגשת תביעות נגד מדעני אקלים לבתי משפט, באוסטרליה – את האיסור על מדעני אקלים עובדי ממשלה להתבטא בתקשורת בעניין, ובישראל – את ההתקפות בתקשורת של המדען הראשי לשעבר של משרד החינוך, גבי אביטל. התקפות מסוג זה גורמות לבלבול אצל מדענים רבים. מטרת הסקירה הנוכחית היא להבהיר את ההבדלים בין העובדות המדעיות המבוססות לשאלות מחקר שנתרו עדיין פתוחות בתחום האקלים. לשם כך אסקור את התקדמות ההבנה של השפעת גזי חממה על מערכת האקלים, החל מתחילת המחקר בנושא, ואתמקד בעובדות המפתח.

מאזן הקרינה של כדור הארץ וגזי חממה

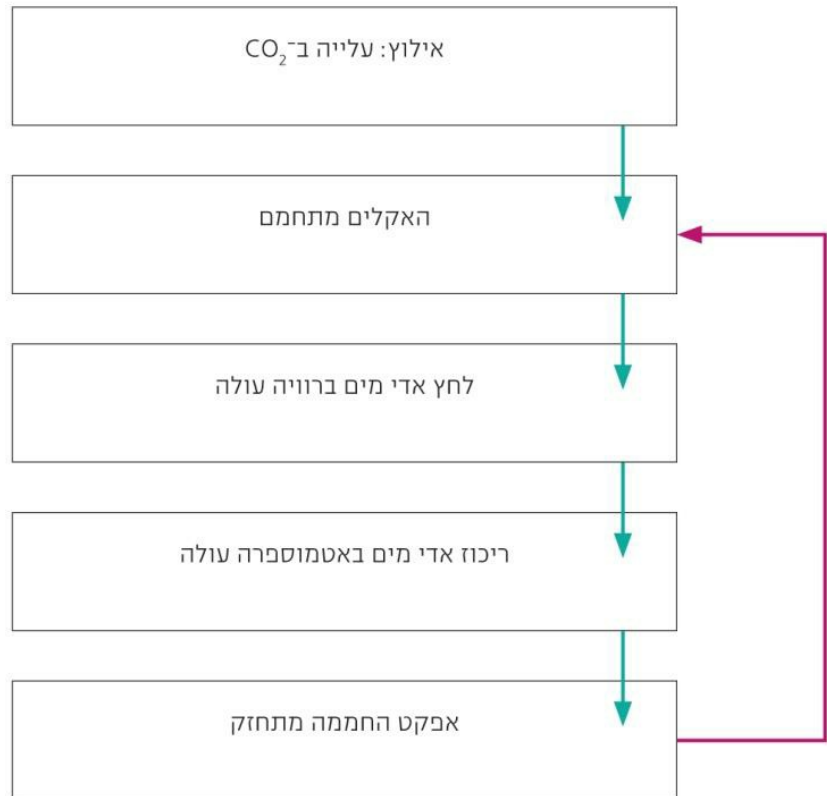
אחד מהחוקרים הראשונים שעסקו בטמפרטורת כדור הארץ היה המתמטיקאי והפיזיקאי הצרפתי ז'וזף פורייה (Fourier). פורייה חישוב בשנת 1824 את מאזן הקרינה של כדור הארץ, בהתבסס על טמפרטורת השמש ועל המרחק שלה מכדור הארץ, ועל בסיס הערכת החלק היחסי של קרינת השמש שמוחזר לחלל (אלבידו) עקב פגיעה במשטחים שונים (לדוגמה עננים, קרח, ובמידה פחותה יותר – קרקע מדברית). להפתעתו, מאזן זה העלה שכדור הארץ אמור להיות כוכב קפוא, בניגוד לתצפיות שמראות מים נוזליים המכסים כשלושה רבעים מפני השטח שלו. כדי ליישב את חישוביו עם העובדות התצפיות, הוא שקל, ולאחר מכן גם פסל, הסברים אפשריים שונים, ביניהם האפשרות שאולי קרינה מכוכבים רחוקים היא המחממת את כוכב הלכת שלנו. ההסבר האמיתי ניתן רק 35 שנה מאוחר יותר, בשנת 1859, באמצעות ניסויו הנוודע של המדען האנגלי ג'ון טינדל (Tyndall).^[24] בניסויו זה העביר טינדל קרינה אינפורה אדומה דרך שפופרת שהכילה גזים שונים. הוא גילה של- CO_2 (פחמן דו-חמצני) ולאדי מים יש יכולת לבלוע חלק מהקרינה האינפורה אדומה שעוברת דרכם. טינדל גם הבין את המשמעות האקלימית של תגלית זו: גזים הבולעים קרינה אינפורה אדומה אך שקופים לאור נראה, גזי חממה כפי שאנחנו קוראים להם כיום, יאפשרו לקרינת השמש לחמם את פני השטח, אך יבלעו חלק מהקרינה האינפורה אדומה הנפלטת מפני השטח, ויגרמו לכליאת אנרגיית חום בשכבות הנמוכות של האטמוספירה. לניסויו של טינדל יש כמובן חשיבות עצומה, והמערכת הניסויית שלו הייתה בהחלט מרשימה לאותה תקופה. אך למרבה הצער, למערכת זו היה חיסרון בולט אחר, שהועתק בניסויים נוספים שנערכו שנים רבות לאחר מכן.

חיסרון זה הוא קיום כל המדידות כאשר לחץ הגזים בצינור הוא לחץ אטמוספרי. בלחץ כזה, שהוא גבוה יחסית, קיימת השפעה הדדית בין המולקולות השונות באוויר, שמשנה את תכונות הבליעה. תופעה זו גורמת לכך שקווי הבליעה האופייניים לכל מולקלה במספר תדרים ספציפי, מתרחבים והופכים לפסים המשתרעים על תחום תדרים (pressure broadening). כתוצאה מכך, היו חוקרים שסברו בטעות ש- CO_2 אינו גז חממה חשוב, משום שנראה שפסי הבליעה של אדי מים חופפים לאלה של CO_2 . אולם בשנת 1952 גילה מחקרו החשוב של לואיס קפלן [10] (Kaplan) כי בשכבות הגבוהות של הטרופוספירה, שהלחץ בהן נמוך וגם כמות אדי המים קטנה, חוזרים פסי הבליעה של CO_2 ושל אדי מים להיות קווים צרים שאינם חופפים זה לזה. הקרינה האינפרא אדומה נפלטת מכדור הארץ לחלל משכבות גבוהות אלה, ולכן לבליעה על-ידי CO_2 יש חשיבות רבה. ממחקרים אלה מהמאה ה-19 ומשנות ה-50 של המאה ה-20 נובע כי פחמן דו-חמצני הוא גז חממה חשוב.

שינויים בריכוזי הפחמן הדו-חמצני

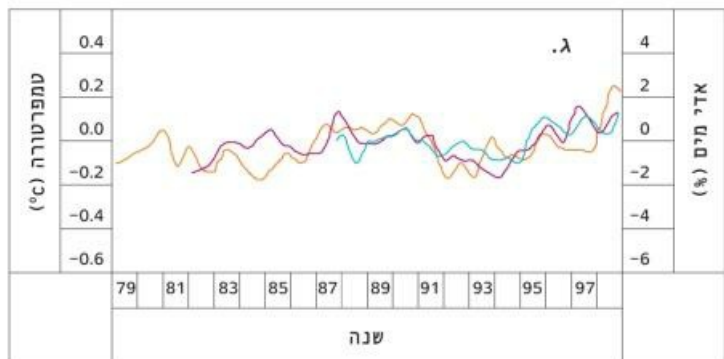
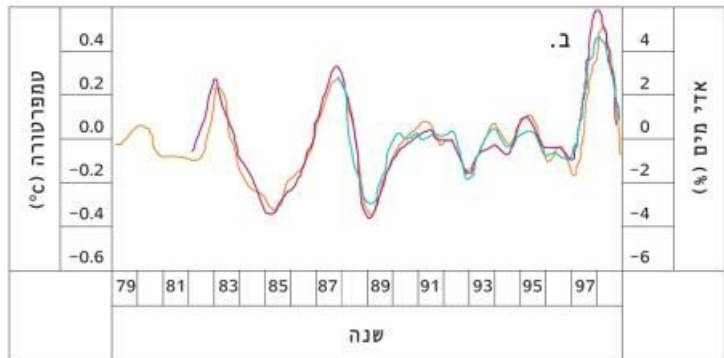
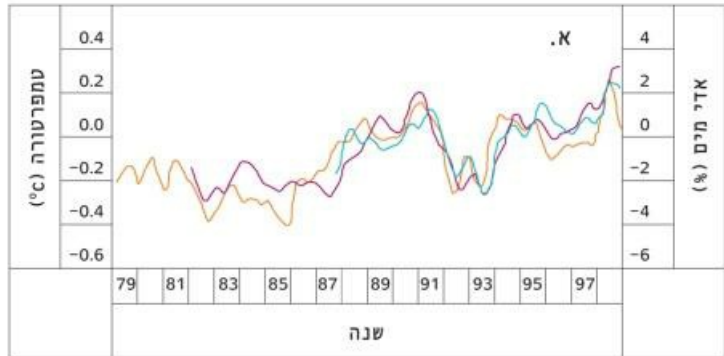
החוקר הראשון שהציע שלשינויים בריכוז ה- CO_2 יש השפעה חשובה על האקלים הוא סוונטה ארניוס (Arrhenius). בשנת 1896 הציע ארניוס [1] כי שינויים בריכוז האטמוספרי של CO_2 הם הגורם לתנודות בין תקופות קרח לתקופות בין-קרחוניות. קיומן של אותן תקופות קרח בעבר היה ידוע כבר אז, ממחקריהם של גאולוגים שמצאו עדויות לפעילות קרחונים בקווי רוחב נמוכים יחסית. ארניוס אף שקל את האפשרות ש- CO_2 משפך דלקי מחצבים יכול להשפיע על האקלים, ואולי אף להפוך את החורף בארצו, שוודיה, לקשה פחות. הוא דחה את הרעיון מפני שסבר בטעות, שכמות ה- CO_2 שנפלטת על-ידי האנושות היא קטנה, ותיספג במהירות באוקיינוסים. תובנה אחרת שתרם ארניוס קשורה למשוב אדי המים. משוב זה מוצג באופן סכמטי ב**איור 1**. אילוף חיצוני למערכת האקלים גורם לעלייה בטמפרטורה. כתוצאה מהחימום עולה לחץ האדים ברוויה של אדי מים, על פי משוואת קלאוסיוס-קלפיירון (Clausius-Clapeyron). במילים פשוטות, העלייה בטמפרטורה מובילה לכך שהאטמוספירה יכולה להכיל יותר אדי מים. אם הלחות היחסית תישאר קבועה, ובשל כך תעלה הלחות הסגולית (כלומר, אם האפשרות להכיל יותר אדי מים תגרום לכך שהאטמוספירה אכן תכיל יותר אדי מים), אפקט החממה יתחזק. זאת משום שאדי מים, כפי שהוסבר לעיל, הם גז חממה חשוב (ולמעשה החשוב ביותר) בכדור הארץ. התחזקות אפקט החממה תגרום להתחממות נוספת לזו שיצר האילוף המקורי, וכך ייגרם משוב חיובי, כלומר התחממות תביא להתחממות נוספת. אך האם כמות אדי המים באטמוספירה אכן עוקבת אחר הטמפרטורה, והלחות היחסית נשארת בקירוב קבועה? מתברר שכן, כמו שהראו מחקרים שעקבו אחרי השינויים לאורך זמן (**איור 2**). כתוצאה משוב אדי המים, ההתחממות שתיגרם גדולה בערך פי שלושה מהתחממות שנובעת מה- CO_2 ישירות. יש לציין שלמרות חשיבותם של אדי המים כגז חממה, הם מהווים משוב בלבד לאלוצים אחרים, וריכוזם באטמוספירה נקבע בעיקר על-ידי הטמפרטורה. זאת בין השאר משום שזמן השהות הממוצע שלהם באטמוספירה הוא כ-10 ימים בלבד, להבדיל מאלפי שנים עבור CO_2 .

איור 1. משוב אדי מים



איור 1
משוב אדי מים

איור 2. סדרות זמן של הסטיה מהמוצע של שלושה משתני אקלים ריכוז אדי מים W (כחול), טמפרטורת פני הים T_s (סגול), וטמפרטורת האוויר T_A (כתום) מוצגים לקווי הרוחב הצפוניים (20°N-60°N; א), הטרופיים (20°S-20°N; ב) והדרומיים (20°S-60°S; ג). טמפרטורת האוויר מחולקת ב-1.6. האיור בעקבות Schabel ו-Wentz^[25]. יש קשר הדוק בין הטמפרטורה לריכוז אדי מים.



— T_A טמפרטורת האוויר — T_s טמפרטורת פני הים — W ריכוז אדי מים

איור 2

סדרות זמן של הסטיה מהמוצע של שלושה משתני אקלים

ריכוז אדי מים W (כחול), טמפרטורת פני הים T_s (סגול), וטמפרטורת האוויר T_A (כתום) מוצגים לקווי הרוחב הצפוניים (20°N-60°N; א), הטרופיים (20°S-20°N; ב) והדרומיים (20°S-60°S; ג). טמפרטורת האוויר מחולקת ב-1.6. האיור בעקבות Schabel ו-Wentz^[25].

יש קשר הדוק בין הטמפרטורה לריכוז אדי מים.

בשנות ה-30 הציע מילוטין מילנקוביץ' (Milankovitch) תאוריה חדשה לגבי האילוף האקלימי שגורם לתקופות קרח. הצעתו הייתה שתקופות קרח נגרמו על-ידי שינויים מחזוריים אטיים במסלול כדור הארץ ובנטיית הציר שלו. טענות אלו לא זכו לאהדה בשנים אלה משתי סיבות עיקריות: הסיבה הראשונה היא שבתקופת הזמן שבה, לפי חישוביו של מילנקוביץ', היו צריכות להתרחש 8 תקופות קרח, דיווחו הגאולוגים על 4 בלבד. מחקרים שנערכו בשנות ה-70 באמצעות קידוחים עמוקים בקרקעית האוקיינוסים, וניתוח גלעיני הסדימנט באמצעות איזוטופים יציבים, הראו שמילנקוביץ' אכן צדק [6]. הסיבה שהגאולוגים בשנות ה-30 הכירו רק 4 תקופות קרח נעוצה בכך שהתקדמות קרחונים בתקופת קרח מאוחרת יכולה למחוק את העדויות לתקופת הקרח שקדמה לה. סיבה שנייה לכך שהתאוריה של מילנקוביץ' לא התקבלה באהדה היא המחשבה שתאוריה זו עומדת בניגוד לזו של ארניוס, שלפיה שינויים ב- CO_2 גורמים לתקופות קרח. כפי שאראה בהמשך, כיום אנו מבינים שתאוריות אלו אינן סותרות, אלא דווקא משלימות זו את זו. מילנקוביץ' שנפטר ב-1958 לא זכה לחזות בהערכה המדעית הרבה שהתאוריה שלו מקבלת כיום.

התגלית החשובה הבאה אירעה בשנות ה-50. חוקר בשם הנס סוס (Suess) גילה כי טבעות של עצים, שתוארכו על פי ספירת הטבעות שלהם לסוף המאה ה-19, הכילו יותר פחמן 14 (באופן יחסי לפחמן 12) מאשר טבעות שתוארכו לשנות ה-20, בעוד האחרונות הכילו יותר פחמן 14 מטבעות שתוארכו לשנות ה-30. מגמה כזו, של פחות פחמן 14 בטבעות עצים צעירות יותר, הייתה ההפך ממה שציפה לו. זאת משום שפחמן 14 הוא איזוטופ רדיואקטיבי, שריכוזו אמור לרדת עם הזמן. סוס הבין כי הגורם לתופעה היא שרפת דלקי מחצבים (פחם, נפט, וכו'). בדלקים אלה, בגלל גילם הרב, כל הפחמן 14 כבר עבר פירוק רדיואקטיבי. לכן שרפה של דלקים כאלה גורמת לפליטה של האיזוטופים היציבים של הפחמן (כלומר בעיקר פחמן 12) בלבד, וכתוצאה מכך חל דילול של הפחמן 14 באטמוספירה. במילים אחרות, סוס זיהה בפעם הראשונה "טביעת אצבע" ברורה של האנושות על ה- CO_2 באטמוספירה. חותמת איזוטופית דומה זוהתה בשנות ה-70 גם בפחמן 13 באטמוספירה [23]. התברר אם כן, שארניוס טעה בהעריכו שהאוקיינוס יוכל לקלוט את כל ה- CO_2 שהאנושות תפלוט. הבנה זו הביאה את רוג'ר ראוויל (Revelle) לחקור יחד עם סוס את הנושא. הם ערכו חישובים גאוכימיים לגבי השכבה העליונה של האוקיינוס שנמצאת במגע עם האטמוספירה, ומצאו כי יכולתה לקלוט CO_2 היא מוגבלת. הם חישובו ומצאו שחלק ניכר מה- CO_2 שהאנושות פולטת כתוצאה משרפת דלקים יישאר באטמוספירה מאות ואלפי שנים, וטענו שהמשך ההצטברות של הגז יכול להיות בעל השפעה ניכרת בעתיד [19]. הם אף הוסיפו וקראו לערוך מדידות של ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה. אמנם באותן שנים לא הייתה לאף מעבדה יכולת למדוד CO_2 בדיקת הדרוש – מדידה של מאות חלקים למיליון (ppm או חל"מ) בדיקת של פחות מחל"מ אחד, אך ראוויל גייס למשימה פוסט-דוקטורנט צעיר בשם דייב קילינג (Keeling) שהצליח לפתח מכשיר ייחודי שהיה מסוגל לעמוד במשימה.

קילינג הציע להציב את המכשיר שפיתח (infra-red gas analyzer) באזורים מבודדים בעולם. כך, האוויר שימדוד לא יושפע ממקורות מקומיים כמו תחנות כוח או מכונות, וגם לא ממבלעים מקומיים ל- CO_2 כמו צמחייה [11]. קיומו של מימון זמין אפשר לקילינג להתחיל במדידות בפסגת הר המאונה לואה (Mauna Loa) בהוואי, בקוטב הדרומי, ובנקודה הצפונית ביותר באלסקה – פוינט בארו (Point Barrow). לאחר ארבע שנים של מדידות, מ-1957 עד 1960, הראה קילינג את קיומו של מחזור עונתי בריכוז ה- CO_2 במאונה לואה, וקשר אותו לפעילות הביוספירה היבשתית בחצי הכדור הצפוני. כמו כן, הוא מצא מגמת עלייה בריכוז: מכ-315 חל"מ בערך המקסימום השנתי של 1958 לכ-317 חל"מ בערך המקסימום של 1960. המשך העבודה נקלע לקשיים, כשהגורמים המממנים סירבו להעניק תקציב לניטור שוטף. אך קילינג לא נכנע, וכתוצאה ממאבקיו ומהעבודה המדעית המצוינת שביצע, עומדים כיום לרשותנו הנתונים המוצגים ב**איור 3א**. מנתונים אלה עולה כי פעילות אנושית גרמה לעלייה של 39% בריכוז ה- CO_2 באטמוספירה עד עכשיו. על פי תחזיות של המשך גידול הפליטות אם לא ייעשה דבר לריסון, הריכוז עלול לגדול לפי ארבעה מהריכוז הטבעי עד סוף המאה.

קרח מול מודלים

התפתחותם של המחשבים האלקטרוניים בשנות ה-60 הובילה להתפתחות נוספת – מודלים נומריים שאפשרו לראשונה להעריך את מאזן הקרינה באטמוספירה. מודלים כאלה נחוצים, משום שנוסף על מעבר אנרגיית חום בין שכבה לשכבה באטמוספירה באמצעות קרינה, חום עובר גם באמצעות הסעה אנכית של חום מוחשי (עלייה של אוויר חם) ושל חום כמוס (עלייה של אדי מים). בשנת 1967 חזה מודל חד-ממדי (רק בממד האנכי) ראשון מסוגו [15], שכלל את התהליכים האלה, כי הכפלת ריכוז ה- CO_2 באטמוספירה תגרום לעלייה של 2 מעלות צלזיוס בטמפרטורה הממוצעת הגלובלית.

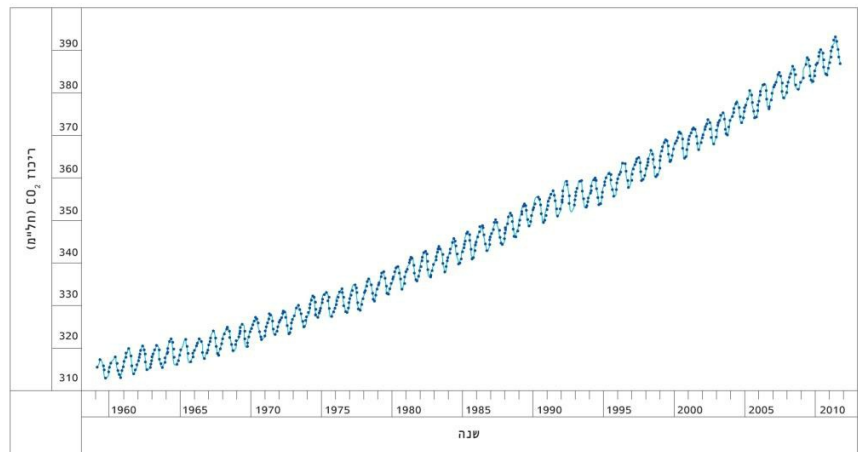
בשנות ה-70 גברה ההתעניינות בתחום. מאמר בעיתון המוביל *Science* טבע לראשונה את המושג "התחממות גלובלית" [3], והרוב המוחלט של המאמרים המדעיים שפורסמו בתחום ניבאו התחממות [17]. עם זאת, העיתונות הפופולרית נתנה מקום בכתבות שער ובסיקורים נרחבים בעיקר למיעוט קטן של מדענים שניבאו התקררות קרובה. פער זה, בין הפרסומים המדעיים לתקשורת הפופולרית, יכול להיראות מפתיע. אך למעשה, גם כיום המצב אינו שונה בהרבה, והתקשורת אינה משקפת בצורה נאמנה את המתפרסם בעיתונות המדעית. הסיבה לתחזית ההתקררות בפרסומים הפופולריים בשנות ה-70 הייתה התקררות שהורגשה בארה"ב משנות ה-60 עד שנות ה-70. התקררות זו לא הייתה גלובלית, ואירעה רק צפונית לחגורת האקלים הטרופי [16]. החלוקה המרחבית של ההתקררות העלתה את ההשערה הרווחת כיום, שלפיה התקררות זו נגרמה מאחר שבמדינות המפותחות

חלה עלייה בריכוזים של ארוסולים (חלקיקים זעירים). ארוסולים אלה שמקורם בפעילות תעשייה ותחבורה, מחזירים את קרינת השמש (מעלים את האלבידו). לפי השערה זו, חוקי "אוויר נקי" שנחקקו בשנות ה-70 וגרמו לירידה בזיהום האוויר, גרמו לירידה גם באפקט הקירור. עם זאת יש לציין שהשפעת הארוסולים על האקלים היא סבוכה, ועדיין לא מובנת דייה [9].

בתחילת שנות ה-80 הוביל המשך התפתחותם של המחשבים ושל הידע האקלימי למודלים תלת-ממדיים של האטמוספירה. בין השאר, קבעו חישובים שנעשו באמצעות מודל כזה כי הדרך היחידה להסביר את הטמפרטורה הנמוכה בשיא תקופת הקרח האחרונה, היא להניח שריכוז ה- CO_2 באותה תקופה היה נמוך באופן משמעותי [7]. תוצאות של קידוח שנערך בכיפת קרח באנטארקטיקה שהתפרסמו מספר שנים מאוחר יותר [2] אישרו מסקנה זו. תוצאות אלה מתבססות על קידוח והוצאת גלעיני קרח מעומקים שונים, עד מספר ק"מ. גלעיני קרח אלה מכילים בוועת אוויר זעירות שנלכדו בין גבישים של שלג שירד לפני עשרות ומאות אלפי שנים. מדידה של ריכוז ה- CO_2 בבוועת מאפשרת מדידה כמעט ישירה של האטמוספירה בעבר. מדידה של האיזוטופים היציבים של מימן ושל חמצן בקרח מאפשרת להעריך את הטמפרטורה באותה תקופה. תוצאות המדידות שנערכו על גלעינים אלה (איור 3ב) מראות בבירור שבמצב יציב, ריכוז CO_2 גבוה כרוך בטמפרטורה גבוהה, וריכוז CO_2 נמוך כרוך בטמפרטורה נמוכה. בזמנים שחל בהם השינוי בטמפרטורה, הקשר סבוך יותר.

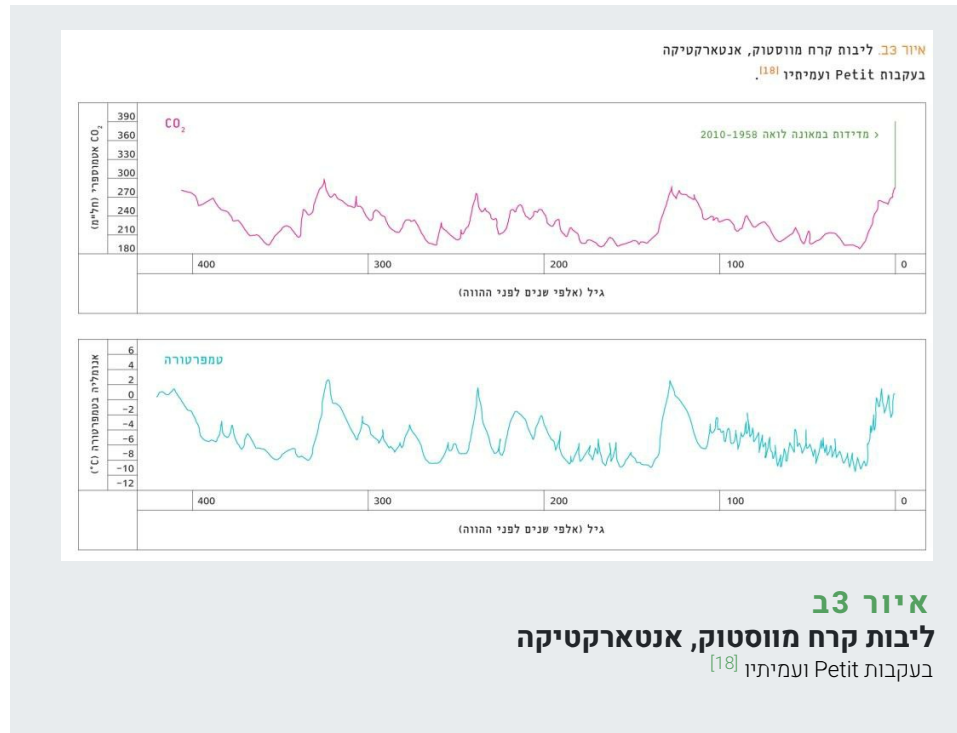
קשר זה מובן כיום באופן הבא: ההתקררות שמובילה לתחילת היווצרותו של עידן קרח נובעת מאילוץ אקלימי שנובע מאותם שינויים מחזוריים שגילה מילנקוביץ'. עם זאת, האילוץ האקלימי של אותם מחזורים קטן, ואינו מסוגל לגרום לתקופת קרח בעצמו. האילוץ גורם להפעלה של מספר תהליכי משוב חיוביים שמחזקים את ההתקררות. אחד ממנגוני המשוב החשובים הוא קליטה מוגברת של CO_2 באוקיינוסים, בעיקר באוקיינוס הדרומי שמסביב לאנטארקטיקה, באמצעות שורה של תהליכים סבוכים שעדיין נחקרים. מצב זה ש- CO_2 פעל בו כמשוב, שונה כמובן מהמצב כיום שבו CO_2 ממקור אנושי מהווה אילוץ למערכת האקלים, אך ממחיש את ההשפעה החשובה של גז זה על הטמפרטורה הגלובלית. העלייה התלולה בריכוז ה- CO_2 (איור 3), הרחק מעבר לתחום שנחווה אי פעם על-ידי המין האנושי, צריכה אם כך לזכות להתייחסות.

איור 3א. ריכוז חודשי ממוצע של פחמן דו-חמצני בפסגת המאונה לואה, הוואי לקוח מאתר מכון המחקר Scripps באוניברסיטת סן דייגו, קליפורניה [20].



איור 3א ריכוז חודשי ממוצע של פחמן דו-חמצני בפסגת המאונה לואה, הוואי

לקוח מאתר מכון המחקר Scripps באוניברסיטת סן דייגו, קליפורניה [20]



גל חום שפקד את ארה"ב ב-1988, כתוצאה מאירוע אל-ניניו קיצוני, הפנה את תשומת לב התקשורת והפוליטיקאים להתחממות הגלובלית. נראה שכמו בשנות ה-70, גורמים אלה מגיבים בעיקר לאירועים נקודתיים – כמו האסון שגרמה סופת ההוריקן קתרינה ב-2005 – ולא למגמות ארוכות טווח ולניבויים מדעיים (ששנים רבות מראש חזו גם את הנוק הצפוי לניו-אורלינס אם לא יינקטו צעדים להגן עליה). עם זאת, אותו אירוע העניק הזדמנות למדען אקלים מוביל מנאס"א בשם ג'ים הנסן (Hansen) להעיד בפני הקונגרס, ולהציג לראשונה בצורה רחבה את העדויות המדעיות בקשר להתחממות הצפויה. מעניין לציין שהמודל של הנסן מאותה שנה, חזה בצורה נאמנה את התחממות שחלה מאז ועד 2010 [8].

מהצד השני, ישנם חוקרים בודדים שמנסים לקשור את ההתחממות לגורמים טבעיים, ובעיקר לשמש. האילוץ האקלימי כתוצאה מהשינויים בקרינת האור הנראה שנפלטת מהשמש הוא קטן, ואינו יכול להסביר את ההתחממות שחלה במחצית השנייה של המאה ה-20. בעקבות זאת ניסו חוקרים אלה להסביר את ההתחממות כתוצאה של שינויים באורך המחזור של פעילות השמש, שאורכו כ-11 שנה. אף על פי שלא הוצגה עדות שתומכת בטענה שאורך המחזור יכול להשפיע על האקלים, הופיע מחקר שהראה מתאם גבוה בין השינויים מאוחר יותר התברר שמתאם זה נובע מטעות. לאחר מכן הוצג מתאם בין הקרינה האולטרה סגולה שנפלטת מהשמש לבין הטמפרטורה הגלובלית (שוב, בלי עדות למנגנון), אך התברר שגם מתאם זה מבוסס על טעות [5]. בעשור האחרון עלתה לכותרות בעיתונים הפופולריים תאוריה חדשה-ישנה, הקושרת בין שטף הקרינה הקוסמית שמגיע לכדור הארץ (שהשינויים בו נשלטים בעיקר על-ידי פעילות השמש) להתחממות. לפי הטענה, שטף זה משפיע על העננות, ואכן הוצג מתאם, שגם הוא הופרך לאחר ביצוע מספר רב יותר של תצפיות [13]. עם זאת טענו התומכים בהשפעת השמש, כמו הנריק סוונסמרק (Svensmark), כי פעילות השמש גבוהה כיום יותר ממה שהייתה אי פעם באלף השנים האחרונות, ולכן לשיטתם יש להתחממות. אף על פי כן, התברר שפעילות השמש הייתה בשיאה בשנות ה-60 וה-70. מאז קיימת מגמת ירידה שמחריפה בעשור האחרון, ופעילות השמש הגיעה ב-2009 למינימום הנמוך מזה מאות שנים [14]. באותו זמן, הטמפרטורות הגלובליות ממשיכות לטפס, כפי שמראות המדידות בתחנות שטח ובמי האוקיינוסים, והמדידות מלוויינים [9], וכפי שמראים השטחים ההולכים והמצטמצמים של קרחים באזור הארקטי [4], כמו שצפו הנסן וחוקרים אחרים. המסקנה היא אם כך שעלייה נוספת בריכוז גזי החממה תגרום להתחממות נוספת.



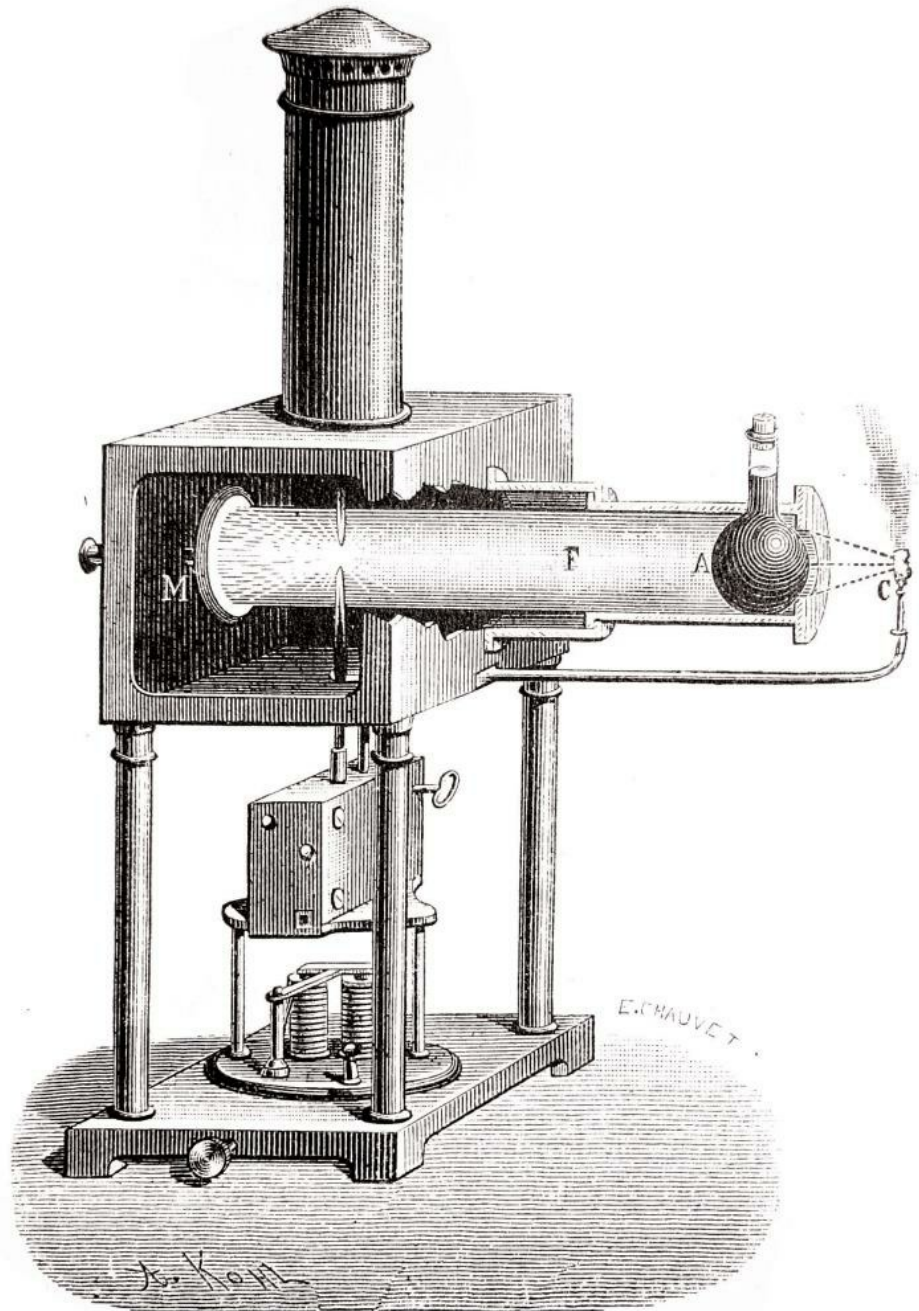
מידת שטפי פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה לביוספירה היבשתית בשיטת eddy covariance | הצילום באדיבות © ARM Climate Research Facility

רגישות אקלימית

השאלה המכרעת שעומדת בפני חוקרי האקלים כיום היא מה יהיה קצב ההתחממות. קצב זה תלוי במידה רבה ברגישות האקלימית, שמוגדרת כשיעור ההתחממות שנובע מהכפלה בריכוז ה- CO_2 (כאשר רק משובים הפועלים בצורה מהירה כמו משוב אדי המים נלקחים בחשבון, ומשובים אטיים כמו המסת קרחונים לא נכללים). את הרגישות האקלימית אפשר להעריך בדרכים שונות. אפשר למשל להשתמש במודלים אקלימיים. מודלים אלה מבוססים על מיטב הידע שקיים כיום, אך ידע זה כמובן אינו שלם. פערים קריטיים בידע קיימים בקשר למשובים – כלומר גורמים המושפעים מההתחממות ומשתנים, וכתוצאה משינוי זה משפיעים בעצמם על קצב ההתחממות. בין המשובים החשובים שעדיין לא מובנים מספיק ניתן למנות את ההשפעה על עננים (עננים משפיעים גם על האלבידו וגם על אפקט החממה, ועננים מסוגים שונים משפיעים בצורה שונה על שני הגורמים), ואת ההשפעה על קצב קליטת ה- CO_2 על-ידי האוקיינוסים ועל-ידי הביוספירה היבשתית (שכיום קולטים ביחד כמחצית ממה שהאנושות פולטת). דרך אחרת להערכת רגישות אקלימית מתבססת על העבר. אם ידוע מה היו האילוצים האקלימיים בעבר (ולא חשוב אם האילוץ נובע מ- CO_2 או מגורם אחר), ומה היו השינויים בטמפרטורה, אפשר לקבל מהיחס בין השניים את הרגישות האקלימית. הערכות אלה בוצעו בין השאר לגבי המאה ה-20. אך כאן חוסר הידע על השפעתם של ארוסולים שמקורם בזיהום אוויר מקשה על הערכת האילוצים. הערכות אחרות בוצעו על תקופת הקרח האחרונה. כאן, צריך להשתמש בנתונים גאולוגיים על מיקומן של כיפות הקרח (שהחזירו קרינת שמש לחלל), בחישובים מדויקים של האילוצים שנובעים ממחזורי מילנקוביץ', ובנתונים מגלעיני קרח על ריכוז ה- CO_2 . את הטמפרטורה בעבר ניתן לשחזר ממגוון סמנים כמו האיזוטופים היציבים שהזכרתי, סמנים ביולוגיים מולקולריים או אבקת פרחים שהשתמרה ומעידה על חברת הצמחייה שהייתה באזור מסוים. מנתונים אלה ניתן לחשב את הרגישות האקלימית. אך מאחר שקיימת אי ודאות בכל אחד מהנתונים, הרגישות האקלימית שמתקבלת היא לא מספר יחיד אלא טווח. באופן דומה, גם הערכות אחרות שמתבססות על התפרצויות של הרי געש, או על שינויים שחלו במהלך המילניום האחרון, מספקות טווח של ערכי רגישות אקלימית.

איסוף כל ההערכות הקיימות לרגישות האקלימית שבוצעו בשיטות שונות, נותן עקומת התפלגות המייצגת את אי הודאות העיקרית בקשר להתחממות הגלובלית [12]. על פי דו"ח ה-Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) [9] (Change) הרגישות האקלימית להכפלה בריכוז ה- CO_2 באטמוספירה היא בטווח שבין 2-4.5 מעלות, וההערכה הטובה ביותר היא של 3 מעלות. מעניין להשוות הערכות אלה לטענות המתנגדים. מתברר, שגם אלה שיוצרים את הרושם בתקשורת הפופולרית כאילו לשיטתם ההתחממות הגלובלית אינה קיימת, טוענים טענה צנועה בהרבה בעתונות המדעית. טענתם של אלה, שלמעשה גם מקבלת את כל עובדות המפתח שלעיל, היא כי הרגישות האקלימית היא נמוכה יותר מההערכה המקובלת, וקרובה למעלה אחת בלבד. חלקם אף מצהיר על יכולת שמעבר לכל מה שמוכר למדע, להעריך את הרגישות האקלימית בדיוק של עשירית מעלה בודדת. יש לציין, כי אף על פי שההערכה המקובלת היא שקיים רק סיכוי קטן שהרגישות האקלימית של כדור הארץ היא אכן כה נמוכה, עקומת ההתפלגות מראה שסיכוי זה קיים, אם כי הוא דומה לסיכוי שהרגישות האקלימית היא מעל 5 מעלות. אך בואו נניח לרגע שהסיכוי הקטן שהמתנגדים צודקים אכן יתממש, מה תהיה ההתחממות עד סוף המאה הנוכחית? ובכן, כיום אנו נמצאים במגמה של גידול בפליטות שמתאימה לתרחיש שלפיו נגיע לריכוז CO_2 של פי ארבעה מהריכוז הטבעי עד סוף המאה, כלומר שתי הכפלות. זאת כמובן אם לא יבוצעו צעדים לצמצום פליטות. בהנחה של רגישות אקלימית של 1.1 ± 0.1 מעלות, שתי הכפלות בריכוז ה- CO_2 יגרמו להתחממות של למעלה מ-2 מעלות. ערך זה הוכרז לאחרונה בוועידת קופנהגן, באופן שרירותי משהו, כערך הסף להתחממות גלובלית נסבלת, שאותו אין לעבור. כלומר, גם אם נאמץ את דעת המתנגדים, ההתחממות עד סוף

המאה עתידה לחצות את ערך הסף להתחממות מסוכנת. אם נקבל את הדעה המדעית הרווחת, המשך פליטות גזי חממה יוביל לחציית ערך סף זה הרבה קודם לכן. במילים אחרות: קיימת אי ודאות לגבי קצב ההתחממות, אך המשך הגידול בפליטות בקצב הנוכחי יגרום לחציית הרף של 2 מעלות התחממות לפני סוף המאה.



המערכת הניסויית של ג'ון טינדל (Tyndall) שבעזרתה התגלתה תכונתם של פחמן דו-חמצני ואדי מים לבלוע חלק מהקרינה האינפורה אדומה שעוברת דרכם. השילוב של תכונה זו עם שקיפותם לאור הנראה מגדיר אותם כגזי חממה | באדיבות ספריית הפקולטה למשפטים, אוניברסיטת סביליה ©

סיכום

עובדות המפתח המדעיות שהוצגו במאמר זה הן כדלהלן:

1. פחמן דו-חמצני (CO_2) הוא גז חממה.
2. פעילות אנושית גרמה לעלייה של 39% בריכוז הגז באטמוספירה עד עכשיו, ובמגמה הנוכחית תגרום להגדלת הריכוז פי ארבעה עד סוף המאה.
3. עלייה נוספת בריכוז גזי חממה תגרום להתחממות נוספת.
4. קיימת אי ודאות לגבי קצב ההתחממות, אך המשך הגידול בפליטות בקצב הנוכחי יגרום לחציית

הרף של 2 מעלות התחממות לפני סוף המאה.

כפי שצוין בהקדמה, ההתקפות על המחקר בנושא זה הן רבות, ומן הסתם יימשכו גם בעתיד, עקב ההשלכות החברתיות והכלכליות של הממצאים המדעיים. לקורא שנתקל בהתקפות מסוג זה מומלץ לבדוק אם הן נוגעות לאחת מנקודות המפתח שצינו. באופן אולי לא מפתיע, מרבית המתקפות עוסקות בנושאים צדדיים, במטרה לבלבל ולזרוע ספקות בציבור הרחב. בדיקה נוספת שחשוב לערוך היא אם לטענות יש סימוכין בספרות המדעית. בהכנת הסקירה נעזרתי רבות בספר *The Discovery of Global Warming* מאת Spencer Weart, שזמין גם באתר SkepticalScience.com שמפנה למאמרים מדעיים רלוונטיים [21].

ההתקפות על המחקר בתחום זה הופכות למעשה להתקפה על השיטה המדעית בכללותה. לדוגמה, סוונסמרק טוען בספרו [22] כי הציבור הרחב, ולא הקהילה המדעית, הוא זה שצריך לשפוט מה הוא ההסבר המדעי הנכון בקשר להתחממות הגלובלית. טענה זו שקולה לטענה שעל פיה הציבור צריך לשפוט בשאלות מדעיות אחרות, למשל כאלה הנוגעות להנדסה אווירונאוטית או לכימייה אורגנית. אני מקווה שאין מדען שלא יסכים כי על הקהילה המדעית לדחות בתוקף טענות פוסט מודרניסטיות מסוג זה, ולהדגיש את חשיבותו של ידע מדעי מעמיק שנבדק שוב ושוב.

מקורות

1. Arrhenius S. 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science Series* **541**: 237-296
2. Barnola JM, Raynaud D, Korotkevich YS, and Lorius C. 1987. Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature* **329**: 408-414
3. Broecker WS. 1975. Climatic change: Are we on the brink of a pronounced global warming? *Science* **189**(4201): 460-463
4. Comiso JC, Parkinson CL, Gersten R, and Stock L. 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophysical Research Letters* **35**, L01703, doi:10.1029/2007GL031972
5. Damon PE and Laut P. 2004. Pattern of strange errors plagues solar activity and terrestrial climate data. *EOS* **85**(39): 370-374
6. Emiliani C. 1972. Quaternary paleotemperatures and the duration of the high-temperature intervals. *Science* **178**: 398-401. doi: 10.1126/science.178.4059.398
7. Hansen J, Lacis A, Rind D, Russell G, Stone P, Fung I, Ruedy R, and Lerner J. 1984. Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms. In: Hansen J and Takahashi T (Eds). *Climatic Processes and Climate Sensitivity*. Geophysical Monograph 29. Washington DC: American Geophysical Union
8. Hansen J, Sato M, Ruedy R, Lo K, Lea DW, Medina-Elizade M. 2006. Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Science* **103**: 14288-14293
9. IPCC, 2007: Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, and Miller HL (Eds)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press
10. Kaplan D. 1952. On the pressure dependence of radiative heat transfer in the atmosphere. *Journal of Meteorology* **9**(1): 1-12

- Keeling CD. 1998. Rewards and penalties of monitoring the Earth. *Annual Review of Energy and the Environment* **23**: 25-82 .11
- Knutti R and Hegerl GC. 2008. The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes. *Nature Geoscience* **1**: 735-743 .12
- Laut P. 2003. Solar activity and terrestrial climate: An analysis of some purported correlations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **65**: 801-812 .13
- Lockwood M, Harrison RG, Woollings T, and Solanki SK. 2010. Are cold winters in Europe associated with low solar activity? *Environmental Research Letters* **5**, .doi:10.1088/1748-9326/5/2/024001 .14
- Manabe S and Wetherald RT. 1967. Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. *Journal of Atmospheric Sciences* **24**: 241-259 .15
- NASA GISS. [Annual mean temperature change for three latitude bands](#). Viewed 14 Mar 2011 .16
- Peterson TC, Connolley WM, and Fleck J. 2008. The myth of the 1970s global cooling scientific consensus. *Bulletin of the American Meteorological Society* **89**(9): 1325-1337 .17
- Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, Barkov NI, Barnola J-M, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov VM, Legrand M, Lipenkov VY, Lorius C, Pépin L, Ritz C, Saltzman E, and Stievenard M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* **399**: 429-436 .18
- Revelle R and Suess HE. 1957. Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades. *Tellus* **9**(1): 18-27 .19
- [The Scripps Research Institute](#). UCSD. Viewed 5 May 2011 .20
- [Skeptical Science](#). Viewed 5 May 2011 .21
- Svensmark H and Calder N. 2007. *The chilling stars*. UK: Icon books Ltd .22
- Tans PP. 1980. On calculating the transfer of carbon-13 in reservoir models of the carbon cycle. *Tellus* **32**(5): 464-469 .23
- Tyndall J. 1861. On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connection of radiation, absorption, and conduction. *Philosophical Magazine* **4**(22): 169-194, 273-285 .24
- Wentz FJ and Schabel M. 2000. Precise climate monitoring using complementary satellite data sets. *Nature* **403**: 414-416 .25