

מהו פחמן כחול ומדוע הוא חשוב?

David K. A. Barnes*

מכון המחקר הבריטי של אנטרקטיקה, NERC, קיימברידג', בריטניה

סוקרים צעירים

**BUFFALO
MUSEUM OF
SCIENCE**
גיל: 14-18



האקלים המתחמם של כדור הארץ מפחית את כמות השלג והקרח. התחממות הים בקטבים גורמת לפני השטח של הים לקפוא פחות בחורף ולקרחונים לסגת, מה שיוצר מים פתוחים יותר ונטולי קרח. פחות קרח ימי מספק עונת גדילה ארוכה יותר לצמחים ימיים שנקראים מיקרו-אצות (פיטופלנקטון), ומסיר יותר פחמן, בצורה של פחמן דו-חמצני, מהאטמוספירה. גדילתן של מיקרו-אצות מספקת מזון רב יותר לחיות שאוכלות את האצות, ומאחסנות את הפחמן הזה דרך גדילה של הגוף שלהן. הפחמן שמאוחסן בחיים ימיים נקרא פחמן כחול. כשחיה ימית מתה, חלק מהפחמן הכחול נקבר בקרקעית הים, והפחמן הזה מוסר ממחזור הפחמן. כליאת הפחמן הזו בקרקעית הים, או במקומות אחרים, נקראת 'הִקְרָמָה'. כמות הפחמן הכחול בקטבים גדלה עם התחממות האקלים. זה ידוע כמשוב שלילי על שינויי האקלים. כל משוב שלילי על שינויי האקלים חשוב לסיוע בהתמודדות עם ההתחממות הגלובלית. המאמר הזה מסביר מה למדנו ממדידת פחמן כחול.

מחזור הפחמן ופחמן כחול

היסוד פחמן הוא קריטי לכל צורות החיים. הפחמן עובר הלוך ושוב בין האטמוספירה לבין פני השטח של כדור הארץ. ישנו פחמן שמוסס בים, שמאוחסן על-ידי אורגניזמים בתוך

הגוף שלהם, שקבור באדמה ושמאוחסן בסלעים. במחזור הפחמן, פחמן נע בין המקורות האלה. באטמוספירה, הפחמן נוכח כגז פחמן דו-חמצני (CO_2). על האדמה, CO_2 יכול לשמש צמחים בתהליך שנקרא פוטוסינתזה. בפוטוסינתזה, צמחים משתמשים באור השמש כדי להפוך CO_2 למזון שבו הם משתמשים כדי לבנות רקמת צמח חדשה. חלק מהפחמן בצמחים מוחזר לאטמוספירה כ- CO_2 דרך נשימה צמחית. צמחים יכולים להיאכל על-ידי חיות שנושמות CO_2 חזרה לאטמוספירה, ומשתמשות בחלק מפחמן הצמחים הנותר לבנות את הגוף שלהן. כשצמחים וחיות מתים, הפחמן בגוף שלהם חוזר לאטמוספירה כ- CO_2 , כשחיידקים מפרקים את האורגניזמים המתים. העצים הבוגרים, או הצמחים והחיות שקבורים באדמות לחות יכולים להחרים פחמן, כלומר להסיר אותו ממחזור הפחמן, במשך יותר ממאה שנים. במשך תקופות זמן ארוכות, לחץ יכול להמיר את הפחמן הקבור לשמן, פחמן, או סלעים, כמו למשל אבן סיד. פעילות געשית, או שריפת דלקי מאובנים על-ידי בני אדם, יכולים להחזיר את הפחמן המוחזר הזה לאטמוספירה כ- CO_2 . CO_2 מהאטמוספירה יכול לאחר מכן להיות מומס לתוך הים, ושם המחזור יכול להתחיל שוב.

פחמן כחול (Blue Carbon)

פחמן שמאוחסן על-ידי חיים ימיים.

פיטופלנקטון (Phytoplankton)

צמחים זעירים או מיקרו-אצות שתופסות פחמן.

לכידת פחמן (Carbon Capture)

קיבוע של גז פחמן דו-חמצני לאחסון הרחק מהאטמוספירה של כדור הארץ.

החרמת פחמן (Carbon Sequestration)

הסרה של פחמן ממחזור הפחמן (למשל על-ידי קבורה).

משוב שלילי (Negative Feedback)

מיתון או הפחתה של אפקט על-ידי ההשפעה שלו עצמו.

פחמן כחול הוא חלק ממחזור הפחמן שמערב חיים ימיים. החלק הזה במחזור מתרחש בשלושה שלבים. צמחים ימיים, כמו למשל אצות או מיקרו-אצות שנקראות **פיטופלנקטון** לוקחות CO_2 אטמוספרי כשהן מבצעות פוטוסינתזה. זה ידוע **כלכידת פחמן** כחול. חיות קוטב אוכלות את הפיטופלנקטון ואת האצות הימיות ומשתמשות בפחמן שבצמחים האלה כדי לבנות את הרקמות והשלד שלהן. זה ידוע כאחסון פחמן כחול. לאורגניזמים עם פרופורציות גבוהות של שלד, כמו למשל אלמוגים, יש סיכוי גבוה יותר להגן על הפחמן הזה מפירוק חיידקי כשהן מתות. לכן, אומרים שהאורגניזמים האלה מדמימים פחמן. כשפחמן כחול מוסר ממחזור הפחמן ליותר מ-100 שנים, לדוגמה כשחיים ימיים מתים ונקברים בקרקעית הים, השלב האחרון הזה נקרא **החרמת פחמן**.

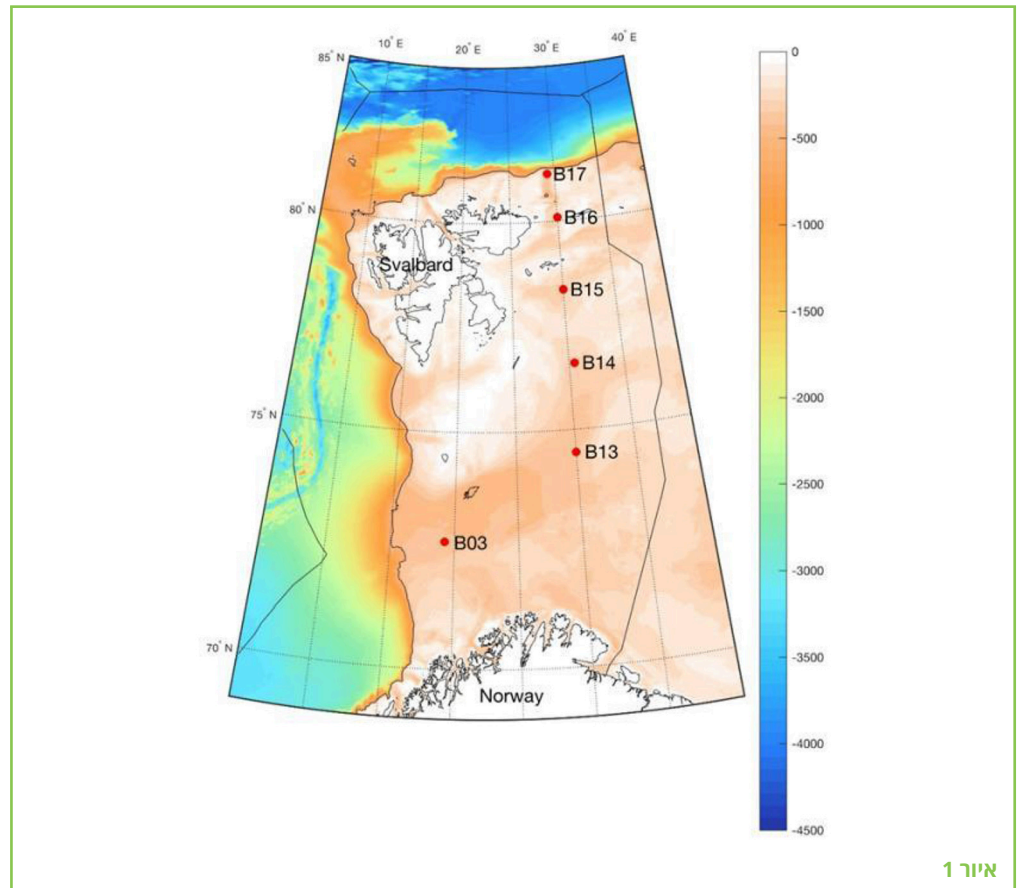
משקעי פחמן ומשוב באקלים משתנה

גזי חממה, כמו למשל CO_2 ומתאן (CH_4), מסייעים ללכוד חום מהאטמוספירה של כדור הארץ. השימוש שלנו בדלקי מאובנים הגדיל את ה- CO_2 באטמוספירה, אשר כולא חום ליד כדור הארץ ומחמם אותו. כתוצאה מכך, אזורי הקוטב מאבדים שלג וקרר [1]. האדמה כהה יותר מהלובן של הקרח, אז אזורים ללא קרח סופגים חום מהר יותר, וזה בתורו ממיס אפילו יותר שלג וקרר. זה נקרא מנגנון של משוב חיובי, אשר מעצים את התחממות האקלים. אולם אובדן קרח גם משחרר מרחב חדש לצמחים ולחיות. מאחר שצמחים וחיות לוקחים פחמן לבניית הגוף שלהם, הם דוגמאות למאגר של פחמן. מאגר של פחמן הוא מקום שבו ישנה הצטברות כוללת של פחמן שהגיע מהאטמוספירה (כמו למשל גדילה יתרה של מיקרו-אצות; מה שמכונה פריחת אצות). צמחים משתמשים ב- CO_2 אטמוספרי כדי לגדול, כך שמקומות חדשים ללא קרח מובילים להפחתה בפחמן האטמוספרי, מה שמפחית את ההתחממות הגלובלית - זה נקרא מנגנון **משוב שלילי** [2]. באופן הזה, הים יכול לספק הרבה משוב שלילי להתחממות האקלים [3].

החרמת פחמן בדרך כלל מתרחשת דרך קבירה של צמחים או חיות במשקעים לחים. זו הסיבה לכך שמרבית המאובנים נמצאים בסלעים שפעם היו משקעים של קרקעית הים, תחתיות אגמים, או ביצות. בים, משוב שלילי יכול להתרחש כאשר פני השטח של ים הקוטב קופאים בחורף, מה שגורם ליותר אור לחדור דרך המים, כך שפיטופלנקטון יכולים לגדול זמן רב יותר. כשפיטופלנקטון מתים, חלק מהם נקברים בקרקעית הים, ומחרימים פחמן.

איור 1

דגימת אתרים בפרויקט Changing Arctic Ocean Seabed בים הקוטב ברנטס. כל נקודה אדומה מייצגת אתר שבו נאספו דגימות. צבע הסרגל מראה את עומק קרקעית הים במטרים.



איור 1

אחרים נאכלים על-ידי חיות, וחלק מהחיות האלה בסופו של דבר נקברות גם הן בקרקעית הים. אז, התחממות של גזי חממה יכולה להוביל לפחות קרח ימי בחורף, מה שמוביל ליותר החרמה של פחמן בקרקעית הים בקוטב, שבתורה מפחיתה את ה- CO_2 האטמוספרי. קרחונים נסוגים מִפְּנִים אפילו יותר מקום לאור ולחיים ימיים, מה שמניע משוב שלילי דומה. התחממות האקלים יכולה גם לגרום לשינויים משמעותיים במדפי הקרח. מדפי קרח הם המקומות שבהם כמות קרח פוגשות את הים וזורמות לתוכו ליצירת נהרות קפואים, ענקיים וצפים. מדפי קרח נרחבים לאורך חצי האי האנטרקטי נשברו בקצה שלהם שקרוב לים, ויצרו קרחונים ענקיים. זה לא רק פותח אזורים חדשים של כליאה ואחסון פחמן על-ידי בעלי חיים, אלא כשהקרחונים שטים הלאה על גבי זרמים, הם משחררים חומרי מזון. חומרי המזון האלה, כמו למשל ברזל קפוא בצורת אבק על האדמה, מדשנים פיטופלנקטון במקומות אחרים באוקיינוס [4]. קרחונים גם יכולים להתנגש עם קרקעית הים בתהליך שמכונה **ice scour**, אשר מוחץ בעלי חיים וצמחים שחיים בקרקעית הים (בנט'ואים), המחזירים פחמן חזרה למחזור הפחמן. פרויקטים מרכזיים, כמו למשל תוכנית Changing Arctic Ocean Seabed (ChAOS) והתפרשו לאורך ים ברנטס (איור 1), מאחר שהיה חשוב למדוד במקומות למדוד ולהבין את השינויים הפיזיקליים והביולוגיים שנגרמים על-ידי התחממות האקלים.

כיצד אנו מודדים פחמן כחול

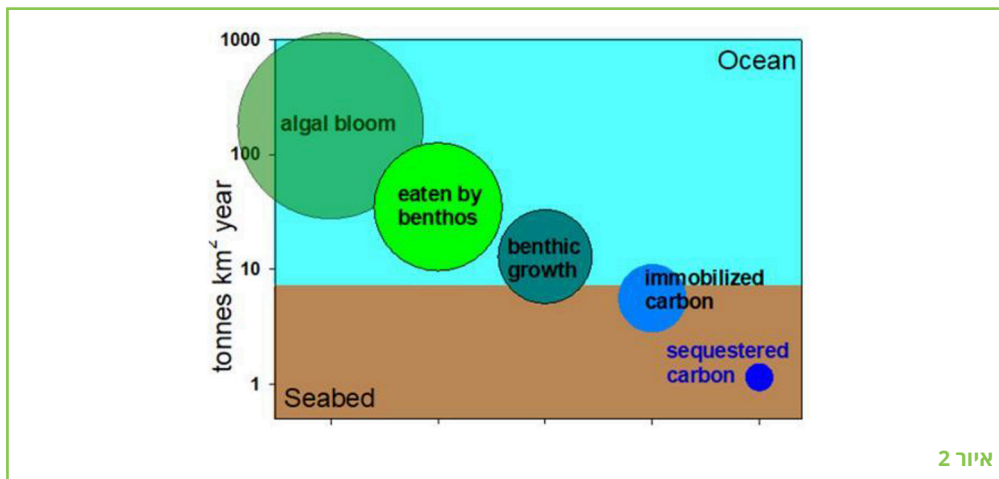
כדי לקבוע אם אובדן של קרח ימי משפיע על כמות הפחמן הכחול, ראשית היינו צריכים לבחור בקפידה אתרי דגימה שנבחרו היו עבור מחקר ה- Changing Arctic Oceans Seabed (ChAOS) והתפרשו לאורך ים ברנטס (איור 1), מאחר שהיה חשוב למדוד במקומות

Ice Scour

התנגשויות בין קרחונים לבין קרקעית הים.

איור 2

שליבים במחזור הפחמן בים הקוטב. רק כמות קטנה של פריחת אצות (פיטופלנקטון; משמאל) נאכלת על-ידי בנט'ואים (שני משמאל, בירוק בהיר), שהן חיות שחיות על קרקעית הים. בתורה, רק כמות קטנה מהאצות שנאכלו הופכת לרקמת חיות (גדילה בנט'ואית, באמצע). פחות ממחצית מהפחמן הזה "מוזדמם" בשלדים של חיות (שני מימין, בתכלת), ורק מחצית 1% יכול להיות מוחרם דרך קבורה (מימין). החרמה מוגדרת כאן כהסרה ממחזור הפחמן למשך יותר מ-100 שנים.



איור 2

שיש לנו כמויות שונות של קרח בעבר ובהווה. במובנים אחרים, האתרים שנבחרו די דומים, לדוגמה במונחים של עומק המים ומאפייני קרקעית הים. המאפיינים הדומים האלה מקלים על פירוש ההבדלים שבין פחמן כחול שנמצא באתרים האלה. הדגימה מבוצעת בכל קיץ, בזמן שבו הכי קל לספינות לשוט בים ברנטס. דגימה של כל האתרים באותה עונה בשנה גם מסייעת להפחית סיבוכי הבדלים בין האתרים.

אפשר לאסוף פיטופלנקטון בדגימות מים או ברשתות פלנקטון, ודרושה תשומת לב כדי לוודא את נפחי המים המדויקים שנחקרים, כך שניתן יהיה לחשב את הצפיפות והמסה של יחידת נפח. הצפיפות, הגודל והזהות של יצורים חיים על קרקעית הים (שידועים גם כ**בנט'ואים**), יכולים להיקבע באמצעות צילומים ממצלמות ברזולוציה גבוהה שמורדות לקרקעית הים על חצובה. האורגניזמים גם יכולים להיאסף בדגימות של משקעים. בדיקות כימיות משמשות לחקור כמה פחמן נמצא בכל עומק. חיות מיובשות ונשקלות באופן שמאפשר למדענים לחשב כמה מהמשקל נובע מרקמה רכה, וכמה מהמשקל נובע משלד. בכל אתר, נלקחות הרבה דגימות כדי לאפשר שונות בגורמי הסביבה, כמו למשל טמפרטורת הים, זרימת המים, המליחות, החמצן המומס, חומרי קרקעית הים (כמו למשל סלעים, חול ואדמה), וקשיחות קרקעית הים.

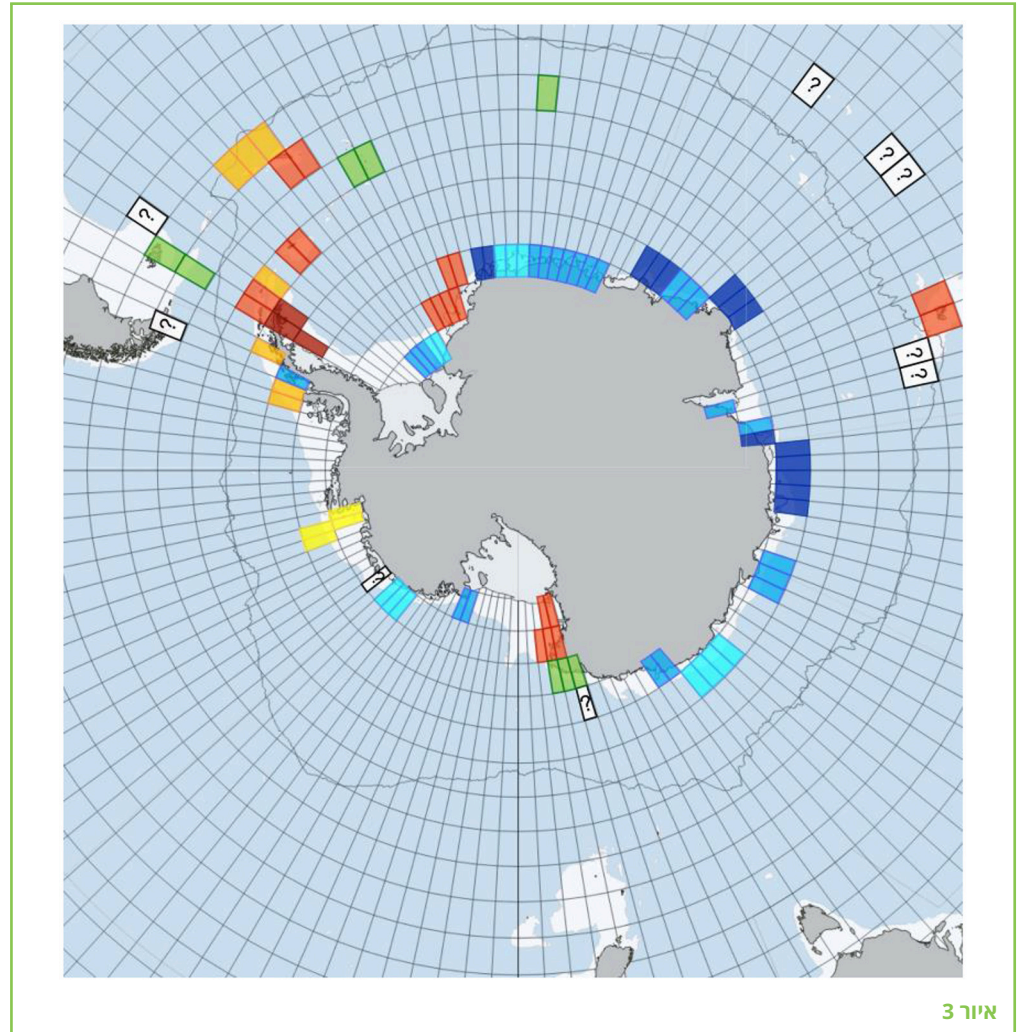
מה הדגימות יכולות להגיד לנו על פחמן כחול?

תהליך הדגימה שמתואר למעלה יכול לספק הרבה מידע על כמות הפחמן שנוכח באורגניזמים מסוגים וגדלים שונים, ומאתרים שונים. השיטה יכולה גם לספק מידע על מספר כל אחד מסוגי האורגניזמים ועל צפיפותם. לאחר מכן אפשר לבצע חישובים של כמות הפחמן שמוחזקת על-ידי אורגניזמים בכל דגימה בכל אתר. אם דגימה 1 מכילה 3 צדפות, 10 תולעים וכוכב ים, אפשר לסכום את הפחמן מכל האורגניזמים ולקבל את כמות הפחמן הכוללת. כשמכניסים את המידע הזה לתוך קובץ או בסיס נתונים, אפשר לנתח אותו ולספק פרטים על הפחמן הכחול שנוכח באורגניזמים.

אפשר לענות על שאלות רבות מהנתונים האלה. באיור 2, אתם יכולים לראות את התשובה לשתיים מהשאלות האלה: כמה מהפחמן בפיטופלנקטון נאכל על-ידי בנט'ואים; וכמה מהפחמן בקרקעית הים נקבר?

איור 3

שינויים בפחמן כחול בסביבת אנטרקטיקה בין 1995 לבין 2015. הצבע האדום מסמן עלייה גדולה בפחמן הכחול, מתונה, הצבע הצהוב מסמן עלייה קטנה, הצבע הירוק מסמן שינויים קטנים בפחמן הכחול, והצבע הכחול כהה מסמן ירידה בפחמן הכחול [5]. סימני שאלה מסמנים דגימות שעדיין נחקרות, ואין מידע על אזורי הרקע הכחולים.



איור 3

ניתן לענות על שאלות רבות נוספות באמצעות שיטות הדגימה שתיארנו, כולל כמה מהפחמן המוחזק על-ידי בנטואים משתנה בתוך האתרים וביניהם, וכיצד פחמן כחול בקרקעית הים משתנה בין אזורים שונים בקוטב? כל המידע הזה מספק הקשר והבנה של תחום העניין העיקרי שלנו: כיצד פחמן קוטב כחול מגיב לאובדני קרח ימי, ומה המשמעות של זה על כוחו של הפחמן הכחול כמשוב שלילי לשינויי האקלים?

מה עוד למדנו?

עד היום, המחקרים מצאו שפחמן כחול משתנה באופן ניכר בקרקעית הים בקוטב. סביב למערב אנטרקטיקה ישנו שינוי קטן בפחמן הכחול בימים מסוימים, כמו למשל ים אמונדסן, אולם שינוי גדול באחרים, כמו למשל בים וודל [2, 5] (איור 3). שינויים בפחמן הכחול יכולים להיגרם על-ידי רוח (ים רוס); אובדן של קרח ימי (ים סקוטיה), או טמפרטורות ימים (דרום ג'ורג'יה). הגדילה של חיות ימיות התגברה הכי הרבה בעשור האחרון במים רדודים, היכן שהחיות קרובות יותר למזון הפיטופלנקטון [3]. אולם התנגשויות של קרחונים עם קרקעית הים גם התגברו, ומחצו את הגדילה החדשה של בנטואים במים הרדודים, והפסיקו את החרמת הפחמן בקרקעית הים. במים עמוקים יותר, גדילת הבנטואים התגברה פחות במהלך

העשור האחרון, אולם התנגשות בין קרחונים לקרקעית הים היא נדירה מתחת לעומק של 100 מטרים. לכן, אף על פי שגדילת הבנט'זאים דומה במים עמוקים ובמים רדודים, הנדירות של התנגשויות בין קרחונים לקרקעית הים במים עמוקים משמעותה שהעליות הקטנות האלה בכמויות הפחמן הכחול ככל הנראה יקברו ויוחרמו בסופו של דבר. קרחונים עצומים ששוברים מדפי קרח מעודדים את הגדילה של פיטופלנקטון ומסייעים להגדיל את הפחמן הכחול. יצירה של קרחון בגודל 5,000 קמ"ר מגדילה את הפחמן הכחול במיליון טון – זה כמו להסיר את הפליטות מהאגוזים של 400,000 מכוניות בשנה [5]. הבנת הפחמן הכחול יכולה לסייע למדענים לייעץ למקבלי החלטות ולפוליטיקאים כיצד להפחית את כמות הפחמן האטמוספרי, שעשוי לשמש להגנה על כדור הארץ שלנו מפני התחממות אקלים מסוכנת.

תודות

תודה לכל משתתפי תוכנית Changing Arctic Oceans research cruise JR17001. לבסוף, תודה לסוקרים, למנטור המדעי שלהם, ול-Jo Barnes על שיפור משמעותי של טקסט כתב היד.

מקורות

1. Parkinson, C. L. 2014. Global sea ice coverage from satellite data: annual cycle and 35-yr trends. *J. Clim.* 27:9377–82. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00605.1
2. Housset, J. M., Girardin, M. P., Baconnet, M., Carcaillet, C., and Bergeron, Y. 2015. Unexpected warming induced growth decline in *Thuja occidentalis* at its northern limits in North America. *J. Biogeogr.* 42:1233–45. doi: 10.1111/jbi.12508
3. Barnes, D. K. A. 2018. "Blue carbon on polar and subpolar seabeds," in *Carbon Capture, Utilization and Sequestration*, ed R. K. Agarwal (London: IntechOpen). p 37–55. doi: 10.5772/intechopen.78237
4. Duprat, L. P. A. M., Bigg, G. R., and Wilton, D. J. 2016. Enhanced Southern Ocean marine productivity due to fertilization by giant icebergs. *Nat. Geosci.* 9:219–21. doi: 10.1038/ngeo2633
5. Barnes, D. K. A., Fleming, A., Sands, C. J., Quartino, M. L., and Deregibus, D. 2018. Icebergs, sea ice, blue carbon and climate feedbacks. *Phil. Trans. R. Soc. A* 376:20170176. doi: 10.1098/rsta.2017.0176

פורסם אונליין: 28 בינואר 2022

נערך על ידי: Dominik K. Großkinsky

מנחה מדעי: Tina Oldham

ציטוט: Barnes DKA (2022) מהו פחמן כחול ומדוע הוא חשוב? *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2019.00154-he

Barnes DKA (2020) What Is Blue Carbon and Why Is It Important? Front. **תורגם והותאם:** Young Minds 7:154. doi: 10.3389/frym.2019.00154

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2020 © Barnes 2022. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

18-14 גיל: BUFFALO MUSEUM OF SCIENCE

אנחנו נערים מדענים שאוהבים ללמוד דברים חדשים ולחלוק אותם עם הקהילה שלנו. אנו קבוצה מגניבה של אנשים שחיים בבופלו, ניו-יורק, ואנו הקבוצה הראשונה אי פעם של יזמת Teen STEM במוזיאון המדע של בופלו.

הכותב

DAVID K. A. BARNES

David Barnes עובד עבור מכון המחקר הבריטי של אנטרקטיקה בקיימברידג', בריטניה, והוא מרצה אורח באוניברסיטת קיימברידג'. הוא חוקר חיים ימיים על קרקעית הים של סביבות קוטב וסביבות מרוחקות, בעיקר מספינות מחקר בקטבים, אולם גם באמצעות שימוש ב-SCUBA מתחנות מחקר רחוקות. הוא מתעניין במיוחד בשירותים של מערכת אקולוגית כמו למשל פחמן כחול, וכיצד אלה משתנים עם שינויי האקלים והשפעות אנושיות אחרות (כמו למשל זיהום פלסטיק). כיום הוא עובד עבור פרויקטי ChAOS, ICEBERGS, Overseas Development Assistance and CoastCarb-
*dkab@bas.ac.uk



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירס מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK