



מציאות מדומה: שימוש במודלים ממוחשבים במטרה ללמוד על שינוי אקלים באוקיינוס הארקטי

James Ward^{1,2*}, Felipe S. Freitas^{1,2}, Katharine Hendry¹, Sandra Arndt³

¹ בית הספר למדעי כדור הארץ, אוניברסיטת בריסטול, בריסטול, בריטניה

² מערכת לביוגיאוכימיה ומידול של כדור הארץ, האוניברסיטה החופשית של בריסל, בריסל, בלגיה

³ המחלקה למדעי כדור הארץ והסביבה, האוניברסיטה החופשית של בריסל, בריסל, בלגיה

סוקר צעיר

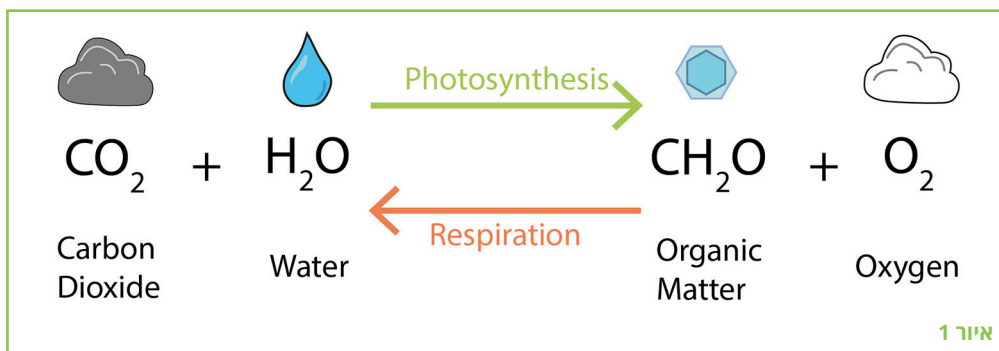
DANNY

גיל: 8



פיטופלנקטון הם הצמחים של האוקיינוס. כאשר הם מתים ושוקעים, הם נהפכים למקור מזון טעים עבור מיקרואורגניזמים, כמו למשל חיידקים שחיים בבוץ ששוקע על קרקעית הים. כאשר המיקרואורגניזמים האלה אוכלים את הפיטופלנקטון, חומרי מזון (כימיקלים שנדרשים לגדילה) שמאוחסנים בתאים של הפיטופלנקטון משוחררים אל תוך המים עם הבוץ. חומרי המזון האלה יכולים אז לברוח אל האוקיינוס, ולהיות בשימוש על ידי פיטופלנקטון חדשים – מעגל החיים! אולם התהליך הזה מורכב ובנוי ממאות תגובות שמשתלבות ומפיקות את התבניות שמדענים צופים בהן כשהם יוצאים למסעות מחקר. כאן המחשבים נעשים מועילים. יש לנו מודלים ממוחשבים של קרקעית הים שמסייעים לנו להבין את רשת התגובות המורכבת שנמצאת בבסיס התצפיות שלנו. המודלים האלה גם יכולים לשמש להדמיות של תנאים קיצוניים, כדי לראות כיצד שינוי אקלים עשוי לשנות את התהליכים החשובים האלה.

איור 1



איור 1

מבצעי פוטוסינתזה, כמו פוטופלנקטון, משתמשים באור שמש כדי ליצור חומר אורגני, שמוצג כאן בתור CH_2O . נשימה של בני אדם ושל חלק מהמיקרואורגניזמים משתמשת באותו החומר האורגני, בשילוב עם חמצן, כדי לייצר אנרגיה. מיקרואורגניזמים אחרים יכולים להשתמש בכימיקלים שונים לצורך נשימה. תגובת הנשימה שלהם דומה, אולם במקום חמצן (O_2), המשוואה באיור תכיל ניטראט (NO_3^-), סולפאט (SO_4^{2-}), או ברזל ($Fe(OH)_3$).

אוטוטרופים (Autotroph)

אורגניזם שיכול ליצור את המזון של עצמו מחומרים פשוטים שנמצאים בסביבתו, כמו למשל פחמן דו-חמצני, בדרך כלל באמצעות פוטוסינתזה.

חומר אורגני (Organic Matter)

חומר מבוסס צמח או חיה שנהפך למזון עבור מיקרואורגניזמים שחיים על קרקעית הים.

הטרוטרופ (Heterotroph)

אורגניזם שלא יכול ליצור את המזון של עצמו, ולוקח חומרי מזון מצמחים או מחומרים של חיות.

נשימה (Respiration)

תגובה כימית שמתרחשת ביצורים חיים, שיוצרת את האנרגיה שהם צריכים כדי לשרוד. כבני אדם, אנו נושמים חמצן ומשתמשים בו כדי לפרק מזון, מה שמשחרר את האנרגיה שמאוחסנת בו.

דיאגנזה (Diagenesis)

סכום התגובות הכימיות והתהליכים הפיזיקליים שמשנים את המשקע כאשר הוא שוקע במים.

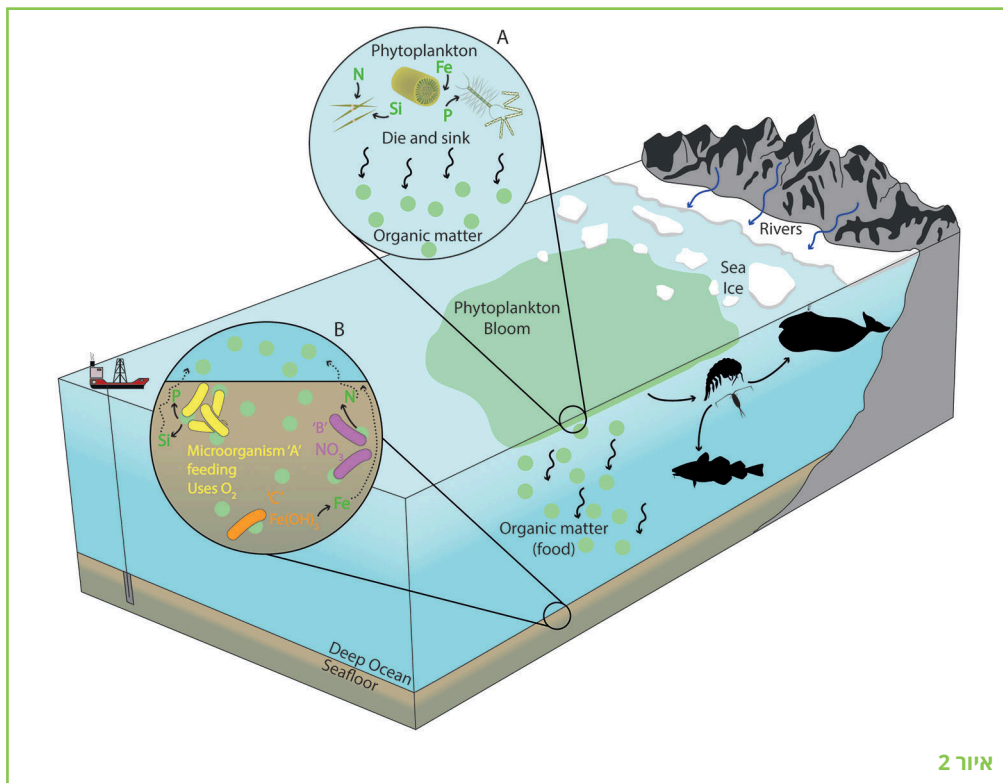
מיקרואורגניזמים בקרקעית הים

פיטופלנקטון הם הצמחים הזעירים של האוקיינוס. אינכם יכולים לראות פיטופלנקטון יחיד ללא מיקרוסקופ, אולם הם יוצרים את הבסיס לכל המערכות האקולוגיות בעולם הימי, ותומכים בכל החיות, החל מלווייתנים קטלניים ועד לדובי קוטב. האורגניזמים האלה, שידועים כ**אוטוטרופים**, שורדים על ידי שימוש באנרגיה מהשמש, בתהליך שנקרא פוטוסינתזה. התהליך הזה לוקח פחמן מהאטמוספירה (בצורה של פחמן דו-חמצני, CO_2) וחומרי מזון מפני השטח של האוקיינוס, ומייצר מזון עבור הישרדות הפיטופלנקטון (איור 1). כאשר הפיטופלנקטון מתים, הם שוקעים ויכולים להיקבר בבוץ על קרקעית הים (איור 2). בנקודה הזו, הם בעצמם נהפכים למקור מזון מצוין וטעים (שאנו קוראים לו "חומר אורגני") עבור מיקרואורגניזמים זעירים. המיקרואורגניזמים שחיים בתוך הסביבה הבוצית הזו דומים לבני אדם, במובן זה שהם צריכים לאכול חומר אורגני כדי לייצר את האנרגיה שדרושה להישרדות. סוג האורגניזם הזה ידוע בתור **הטרוטרופ**. כבני אדם, אנו אוכלים חומר אורגני (פירות, ירקות), נושמים חמצן מהאוויר ומעבדים את הכול במטרה ליצור אנרגיה דרך תגובה שנקראת **נשימה**, שהיא הפוכה מפוטוסינתזה חלק מהמיקרואורגניזמים גם עושים את זה, אם הם חיים בקרבת המים של קרקעית הים, שהם לעיתים קרובות עשירים בחמצן; אולם מיקרואורגניזמים רבים חיים עמוק בתוך קרקעית הים שם אין חמצן. המיקרואורגניזמים האלה עדיין אוכלים חומר אורגני, אולם הם הסתגלו להשתמש בכימיקלים אחרים במהלך הנשימה, כמו למשל ניטראט (NO_3^-) וסולפאט (SO_4^{2-}). חלקם אפילו יכולים להשתמש במוצקים כמו מינרלים של ברזל ($Fe(OH)_3$) [1]! התהליך של פירוק חומר אורגני ושרשרת התגובות המורכבת שמתרחשת בתוך קרקעית הים ידועה בתור **דיאגנזה** [2].

הדיאגנזה שמתרחשת על קרקעית הים חשובה במיוחד, מאחר שכאשר המיקרואורגניזמים של קרקעית הים אוכלים, חומרי המזון שמאוחסנים במזון שלהם משוחררים חזרה אל תוך האוקיינוס (איור 2). לעיתים, כאשר מיקרואורגניזמים משתמשים במינרלים של ברזל מוצק עבור נשימה, גם ברזל יכול להיות משוחרר אל תוך מי האוקיינוס. ברזל נדרש רק בכמויות קטנות עבור פיטופלנקטון, ולכן אנו מתייחסים אליו בתור מיקרונוטריאנט, אולם הוא חיוני להישרדותם ולעיתים אספקתו מועטה! הודות לדיאגנזה, במקום שכל החומר האורגני שנותר על קרקעית הים ייקבר במשך מיליוני שנים, מרבית חומרי המזון שנותרים שם מוחזרים אל המים כדי שיעשה בהם שימוש חוזר על ידי פיטופלנקטון חדשים, לשם התחלת המחזור מחדש. אם המיקרואורגניזמים שבקרקעית הים לא היו קיימים, דמיינו מה היה קורה לחומרי המזון שפיטופלנקטון צריכים לקחת מפני השטח של האוקיינוס. היו פחות חומרי מזון זמינים, מאחר שלא הייתה דרך למחזר אותם! זו הסיבה לכך שכל כך אכפת לנו מתהליך הדיאגנזה,

איור 2

עליות גדולות באוכלוסיות פיטופלנקטון נקראות פריחות. פיטופלנקטון לוקחים פנימה חומרי מזון [כמו חנקן (N), סיליקון (Si), ברזל (Fe), וזרחן (P)] מפני השטח של האוקיינוס ומבצעים פוטוסינתזה, ולאחר מכן הם בסופו של דבר מתים ושוקעים (ראו עיגול A). בנקודה הזו, הם נהפכים לחומר אורגני, מקור מזון למיקרואורגניזמים על קרקעית הים. סוגים שונים של מיקרואורגניזמים (A, B, C) שאוכלים מזון מבצעים נשימה. מיקרואורגניזם A עשוי להשתמש בחמצן לנשימה, כמו בני אדם, אולם C או עשויים להשתמש בניטראט (NO_3^-) או במינרלים של ברזל מוצק ($Fe(OH)_3$) (ראו עיגול B). כאשר מזון מפורק במהלך הנשימה, חומרי המזון שנלקחו במקור מפני השטח של הים על ידי פיטופלנקטון משוחררים לתוך הבוץ, ובסופו של דבר נכנסים אל מי האוקיינוס שם יכול להיעשות בהם שימוש חוזר.



איור 2

מאחר שפיטופלנקטון שמתודלקים על ידי חומרי מזון של האוקיינוס חשופים במיוחד ללקיחת פחמן דו חמצני מהאטמוספירה, מה שהכרחי לסיוע במניעת התחממות מהירה של כדור הארץ כתוצאה מפליטות הפחמן שלנו.

אנו יכולים לחקור את תהליכי קרקעית הים האלה באמצעות ספינות ואיסוף צינוריות בוץ, שידועות בתור ליבות (איור 3). אנו יכולים לקחת את הבוץ הזה חזרה למעבדות שלנו, ולמדוד את ריכוזם של כימיקלים שונים גם בבוץ עצמו וגם במים שנלכדים בתוכו, שנקראים **מי נקבובית**. המידע הזה יכול לסייע לנו להבין מה קורה לחומר האורגני שמגיע לקרקעית הים. לדוגמה, אנו יכולים למדוד כמה חומר אורגני יש וכמה מהר הוא נאכל, ואנו יכולים להסתכל על האופן שבו ריכוזים של כימיקלים שונים שמשמשים במהלך נשימה משתנים מהפסגה לתחתית של הליבה. אולם ישנם תהליכים רבים שיכולים לשנות את הריכוז של הכימיקלים האלה, כולל כאלו שלא מערבים מיקרואורגניזמים. לכן, אף על פי שאנו יכולים למדוד את הכמויות של חומרים מסוימים, לעיתים קשה מאוד לקבוע בדיוק אלו תהליכים מתרחשים על קרקעית הים. אם אנו רוצים לדעת כיצד שינוי האקלים עשוי לשנות את קרקעית הים, אנו צריכים לדעת אלו תהליכים מתרחשים במקומות שאנו מבקרים בהם, וכמה התהליכים האלה חשובים. זו הסיבה לכך שמודלים ממוחשבים כל כך מועילים.

מהו מודל מחשב?

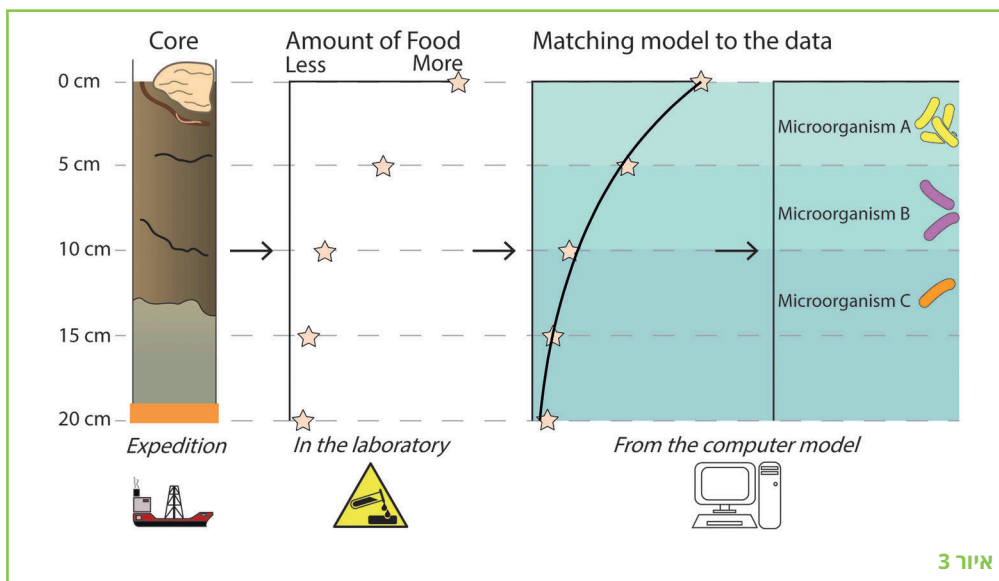
מודל הוא פשוט גרסת הדמיה של העולם האמיתי, כמו משחק מחשב. מודלים כוללים כל דבר החל מהדמיות של טיסה שמסייעות לאָמֵן טייסים, ועד לחיזוי מזג אוויר לחדשות טלוויזיה. הם יכולים להתקיים כציורים פשוטים על פיסת נייר, ועד לצורות מורכבות שנבנות באמצעות

מי נקבובית (Pore Water)

מי ים שנכלאו בתוך הבוץ של קרקעית הים. אנו יכולים לחקור אותם כדי ללמוד על הפעילויות של מיקרואורגניזמים שונים.

איור 3

ליבת משקע נאספת, מלאה בתולעים ובספוגיים! תנאי נבחר, כמו למשל כמות המזון (חומר אורגני) שזמין למיקרואורגניזמים, נמדד במעבדה. כמות המזון פוחתת ככל שיורדים מטה אל תוך הליבה, מאחר שהוא נאכל על ידי המיקרואורגניזמים האלה. באמצעות שימוש במודל שלנו וכווננו עד שהוא מתאים לנתונים, אנו יכולים למצוא אלו מיקרואורגניזמים מתרבים וניזונים בכל רמה, וכמה מהם עושים זאת. כל אחד מהמיקרואורגניזמים האלה יעשה דברים מעט שונים. לדוגמה, כולם אוכלים את אותו המזון, אולם הם משתמשים בכימיקלים שונים כדי לפרק את המזון במהלך נשימה. משום כך, כל מיקרואורגניזם חשוב להשפעה על מה שקורה לכימיקלים שונים על קרקעית הים. מודלים ממוחשבים מאפשרים לנו ללמוד אפילו יותר מהמידע שאנו אוספים ממסעות המחקר ובמעבדה.



איור 3

קוד מחשב. כל המודלים הם גרסאות מפושטות של העולם האמיתי. הם בנויים על בסיס מה שאנו יודעים על העולם, ולכן הם יכולים להפוך למורכבים יותר ככל שאנו מבינים עוד על תהליכים שונים שמתרחשים בחיים האמיתיים. לרוע המזל, מודלים מורכבים יותר דורשים מחשבים חזקים ויקרים יותר כדי שיבצעו את החישובים. המערך של מודלים מורכבים גם דורש יותר תצפיות מהעולם האמיתי, שאינן תמיד זמינות. לכן, כשאנו יוצרים מודלים ממוחשבים, אנו נזהרים לגבי מה שאנו בוחרים לכלול במודלים, מאחר שאנו רוצים להיות מסוגלים לקבל תוצאות במהירות, אולם שלא יהיו פשטניות מדי. לדוגמה, גרפיקה של משחק מהודר שמראה בדיוק כיצד נראה מיישהו או מקום מסוים, תדרוש מהמחשב שלכם לעבוד הרבה יותר קשה מאשר אם אנשים יוצגו כדמויות קווים, והבניינים כלְבָנִים אפורות פשוטות!

במקרה של קרקעית הים, אנו יכולים להשתמש במודל שנקרא הדמיית תגובת הרשת הביוגיאוכימית (BRNS - Biogeochemical Reaction Network Simulator) [3, 4]. ל-BRNS יש יותר מ-40 תגובות כימיות שונות, והוא אפילו יכול לְדַמּוֹת דברים כמו תולעים שמתערבבות בחול [5]. אולם אנו משתמשים ב-BRNS רק עבור ליבות אינדיבידואליות, ולא עבור אזורים גדולים של האוקיינוס, מה שאומר שאנו יכולים להסתכל על מיקום אחד בפרוט רב, אולם עדיין מקבלים תוצאות במהרה עם מחשבים רגילים כמו שיש לכם בבית. באמצעות BRNS, אנו לוקחים מדידות שמדענים אוספים במהלך מסעות המחקר שלהם, ומקבלים מהן הרבה יותר מידע. כדי לעשות זאת, אנו משתמשים בערכים שאנו מכנים **תנאי שפה**, שאומרים למודל על איזה סוג סביבה אנו מסתכלים. לדוגמה, עבור האוקיינוס הארקטי, תנאי השפה כוללים טמפרטורות קרות וקרקעית ים שטוחה, כמו גם כמויות של תרכובות כימיות שמדדנו בליבות של מי האוקיינוס שממש מעליה. הערכים האלה הופכים מודל ריק לקרקעית ים וירטואלית שמייצגת את האוקיינוס הארקטי, אולם המודל יכול להשתנות כדי לייצג כל מקום בעולם, כל עוד המידע זמין. אנו יכולים לשנות את תנאי השפה האלה עד שליבת המשקע הווירטואלי נראית זהה לערכים שמדדנו במעבדה מהליבה האמיתית שלנו. כאשר הליבות הווירטואלית והאמיתית מתאימות, אנו קוראים לזה **התאמה למודל** (איור 3). אז המודל מאפשר לנו לראות כיצד תגובות שונות בקרקעית מתחברות כדי ליצור את התצפיות שלנו מהעולם האמיתי. זה שימושי, מאחר שככל שאנו מבינים יותר על מה שקורה כיום בקרקעית

תנאי שפה (Boundary Condition)

ערך שאנו משתמשים בו כדי להגדיר את סוג הסביבה שאנו מסתכלים עליה. זה כמו הוראות שמסייעות למודל להפיק את הליבה הווירטואלית שדומה למה שמדדנו במעבדה.

התאמה למודל (Model Fit)

כאשר המודל מייצר ליבה וירטואלית שמתאימה בצורה טובה לנתונים שייצרו במעבדה. אנו משיגים זאת על ידי כוונן מוקפד של תנאי השפה.

הים, כך נוכל ללמוד יותר על האופן שבו היא עשויה להשתנות עם הזמן, אם ההתחממות הגלובלית תמשיך לשנות את התנאים בכדור הארץ שלנו.

שאלות מעניינות

כאשר יש לנו את ההתאמה למודל שלנו, אנו יכולים לעשות מה שאנו רוצים עם קרקעית הים הווירטואלית שלנו בלי לגרום לנזק לסביבה האמיתית. אנו יכולים לשאול את מודל המחשב שלנו שאלות כמו "מה היה קורה אם כל הקרח באוקיינוס הארקטי היה נמס?". משמעות הדבר היא שאנו יכולים להסתכל על מה היה קורה לקרקעית הים אם העולם היה שונה, וזהו צעד חשוב לקראת הבנת האופן שבו האוקיינוסים שלנו עשויים להיראות בעתיד. ממשלות צריכות את המידע הזה כשהן מקבלות החלטות שעשויות להשפיע על שינוי האקלים. באוקיינוס הארקטי, ההימסות של קרח ים מגדילה את האזור שבו פיטופלנקטון יכולים לגדול, ולכן המיקרואורגניזמים שבקרקעית הים שלנו עשויים לקבל יותר חומר אורגני בעתיד. אנו יכולים להשתמש במודל שלנו כדי לבחון זאת ולראות כיצד זה עשוי להשפיע על חברות של מיקרואורגניזמים בקרקעית הים, ואיזו השפעה יכולה להיות לכך על המערכת האקולוגית כולה של האוקיינוס הארקטי.

מסקנות

עולמנו משתנה מהר מאוד כתוצאה משינוי אקלים, ומדענים יכולים להשתמש במודלים כמו BRNS כדי להבין כיצד כדור הארץ שלנו עשוי להיראות בעתיד. הסתכלות על מקומות שמשתנים מהר, כמו האוקיינוס הארקטי, יכולה להיות מועילה מאוד, אולם היא גם יקרה וישנו מספר מוגבל של מדידות שאנו יכולים לבצע בגלל מגבלות הזמן! באופן מתסכל, ישנם הרבה תהליכים שאיננו יכולים למדוד ישירות, אפילו שאנו עשויים לדעת שהם מתרחשים. איננו יכולים גם לטייל קדימה בזמן ולצאת למסעות מחקר בעתיד, או להמיס קרח ים ולראות כיצד זה ישפיע על קרקעית הים. זו הסיבה לכך שמידול הוא כלי כל כך חזק. אולם חשוב מאוד לזכור שמידול מוצלח נסמך על קבוצות גדולות של מדענים מרקעים שונים, שעובדים יחד וחולקים מידע משעות רבות של מסעות מחקר ועבודת מעבדה, כדי לוודא שהמודל מייצג את העולם האמיתי בצורה הטובה ביותר!

תודות

פרויקט The Changing Arctic Ocean Seafloor (NE/P005942/1; ChAOS) הוא חלק מתוכנית Changing Arctic Ocean programme, שממומנת על ידי ועדת UKRI Natural Environment Research Council (NERC).

מקורות

1. Kristensen, E. 2000. Organic matter diagenesis at the oxic/anoxic interface in coastal marine sediments, with emphasis on the role of burrowing animals. *Hydrobiologia* 426:1–24. doi: 10.1023/A:1003980226194

2. Boudreau, B. 1997. *Diagenetic Models and Their Implementation*. Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg..
3. Regnier, P., Jourabchi, P., and Slomp, C. 2003. Reactive-Transport modeling as a technique for understanding coupled biogeochemical processes in surface and subsurface environments. *Netherlands J Geosci.* 82:5–18. doi: 10.1017/S0016774600022757
4. Aguilera, D., Jourabchi, P., Spiteri, C., and Regnier, P. 2005. A knowledge-based reactive transport approach for the simulation of biogeochemical dynamics in Earth systems. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 6:Q07012. doi: 10.1029/2004GC000899
5. Meysman, F., Middelburg, J., and Heip, C. 2006. Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea. *Trends Ecol. Evol.* 21:688–95. doi: 10.1016/j.tree.2006.08.002

פורסם אונליין: 23 ביוני 2022

נערך על ידי: Kirsty C. Crocket

מנחה מדעי: Claire Murray

ציטוט: Ward J, Freitas FS, Hendry K and Arndt S (2022) מציאות מדומה: שימוש במודלים ממוחשבים במטרה ללמוד על שינוי אקלים באוקיינוס הארקטי. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2020.00125-he

תורגם והותאם: Ward J, Freitas FS, Hendry K and Arndt S (2020) Virtual Reality: Using Computer Models to Learn About Arctic Climate Change. *Front. Young Minds* 8:125. doi: 10.3389/frym.2020.00125

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

COPYRIGHT © 2020 © Ward, Freitas, Hendry and Arndt 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 (המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקר צעיר

DANNY, גיל: 8

Danny אוהב מדע והנדסה. הוא מתעניין מאוד בחלל ובמחשבים. החלום שלו הוא להיות מדען פוקימון, או אם זה ייכשל – ארכיטקט, או מהנדס שמעצב משחקי קונסולות. Danny הכי שמח כשהוא חוקר רעיונות חדשים ומעצב אבטיפוסים. הוא החליט ליצור את הפוקימון האמיתי הראשון, וכבר יצר אבטיפוס של מכונת דנ"א מקרטון שכתבת דנ"א של פוקימון. אנו מקווים להכיר לו בקרוב את הקונספט של אתיקה מדעית...



הכותבים

JAMES WARD

תמיד הייתי מרותק מכדור הארץ, במיוחד מאזורי הקוטב. עשיתי את התואר הראשון שלי בגיאולוגיה באוניברסיטת בריסטול, והחלטתי שלימודים לדוקטורט יהיו הזדמנות מדהימה להפוך את העניין שלי למשהו מועיל עבור המדע והסביבה! כיום אני עובד על משקעי קרקעית הים מים ברנטס, ומתבונן על האופן שבו שינוי אקלים ונסיגה של קרח ים עשויים להשפיע על מחזור חומרי מזון. אתם יכולים למצוא אותי או במעבדה, מודד איזוטופים של סיליקון בנקבוביות מים, או בשולחן שלי מנסה למדל אותם! jamespj.ward@bristol.ac.uk*

FELIPE S. FREITAS

אני חוקר פוסט-דוקטורנט בבית הספר למדעי כדור הארץ, אוניברסיטת בריסטול, שחוקר כיצד חומר אורגני שמושקע על גבי קרקעית הים מותמר ונקבר. אני משתמש במודלים ממוחשבים בשילוב עם תצפיות שטח ומעבדה כדי להבין מה שולט בשימור ופירוק של חומר אורגני במשקעים ימיים, כמו גם מה ההשלכות של התהליכים האלה על מחזור פחמן ועל אקלים כדור הארץ.

KATHARINE HENDRY

אני ביוגיאוכימאית ואוקיינוגרפית מאוניברסיטת בריסטול. התחלתי את הקריירה שלי במים שברחבי אנטרקטיקה, אולם המשכתי לכיוון הצפון, וכיום אני גם עובדת באזורים הסאב-ארקטי והארקטי. תחומי העניין שלי מצויים בהבנת האופן שבו חומרי מזון חיוניים שמתדלקים את החיים נכנסים אל תוך – ונעים ברחבי – האוקיינוסים. אני משתמשת בשילוב של שיטות דגימה חדשניות, חיישנים ושיטות מתקדמות במעבדה כדי להבין את תהליכי המפתח ששולטים בכימיה של ימות הקוטב שלנו.

SANDRA ARNDT

אני ממדלת ביוגיאוכימאית מהאוניברסיטה החופשית של בריסל בבלגיה. המחקר שלי מתמקד בפיתוח וביישום של מודלים שמעוצבים במטרה לקדם את הבנתנו על האופן שבו חומרי מזון שחיוניים לחיים נעים בתוך אוקיינוסים, ולשפוך אור על התפקיד של הסביבה בעבר, בהווה ובעתיד של מחזור הפחמן והאקלים. אני מתעניינת במיוחד בקבירה של פחמן במשקעים ימיים במהלך הזמן ובסביבות שונות, ובהשפעה שלה על מחזורי חומרי מזון גלובליים ועל אקלים.



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



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK