

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R RS.1883-1
(2018/12)

**استعمال أنظمة الاستشعار عن بُعد
في دراسة تغير المناخ وآثاره**

السلسلة RS

أنظمة الاستشعار عن بُعد

تمهيد

يُضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يُرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار ITU-R 1. وترد الاستثمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

العنوان	السلسلة
البث الساتلي	BO
التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية	BR
الخدمة الإذاعية (الصوتية)	BS
الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)	BT
الخدمة الثابتة	F
الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة المروءة والخدمات الساتلية ذات الصلة	M
انتشار الموجات الراديوية	P
علم الفلك الراديوي	RA
أنظمة الاستشعار عن بُعد	RS
الخدمة الثابتة الساتلية	S
التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية	SA
تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة	SF
إدارة الطيف	SM
التجميع الساتلي للأخبار	SNG
إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت	TF
المفردات والمواضيع ذات الصلة	V

ملاحظة: تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني

جنيف، 2019

التوصية ITU-R RS.1883-1

استعمال أنظمة الاستشعار عن بُعد في دراسة تغير المناخ وآثاره

(2018-2011)

مجال التطبيق

توفر هذه التوصية مبادئ توجيهية بشأن تقديم بيانات الاستشعار عن بُعد المحمولة على متن السواتل لغرض دراسة تغير المناخ.

مصطلحات أساسية

خدمة استكشاف الأرض الساتلية (EESS)، خدمة استكشاف الأرض الساتلية (EESS) (النشطة)، خدمة استكشاف الأرض الساتلية (EESS) (المنفصلة)، الاستشعار عن بُعد، تغير المناخ

التوصيات والتقارير ذات الصلة الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية

التوصية ITU-R RS.1859 – استعمال أنظمة الاستشعار عن بُعد لجمع البيانات التي يتعين استخدامها في حال وقوع كوارث طبيعية وحالات طوارئ مماثلة

التقرير ITU-R RS.2178 – الدور الأساسي للطيف الراديوي وأهمية استعماله على الصعيد العالمي لمراقبة الأرض والتطبيقات ذات الصلة

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

أ) أن تغير المناخ ظاهرة عالمية تؤثر على البشرية جمعاء؛

ب) أن تغير المناخ يُتوقع أن يتجلى في تغييرات خطيرة في بيئة الأرض تستتبع كوارث طبيعية أو تفاقمها؛

ج) أن دراسة تغير المناخ تتطلب حتماً قدرات عالمية لرصد الأرض تنفرد في تلبيتها أجهزة الاستشعار عن بُعد أو المحاسيس المحمولة على متن السواتل؛

د) أن أجهزة الاستشعار عن بُعد المحمولة على متن السواتل توجد وتشغل في نطاقات ترددية موزعة على خدمة استكشاف الأرض الساتلية (EESS) في الوقت الحاضر؛

هـ) أن قدرات الاستشعار تتحسن، على مر الزمن، وأن حساسية الاستشعار تزداد في أجهزة الاستشعار عن بُعد المحمولة على متن السواتل؛

و) أن أنظمة خدمة استكشاف الأرض الساتلية (EESS) و MetSat ضرورية لمراقبة تغير المناخ والتنبؤ به، ومراقبة المحيطات والطقس والموارد المائية، والتنبؤ بأحوال الطقس والمساعدة في حماية التنوع البيولوجي،

وإذ تدرك

أ) أن القرار (673 (Rev.WRC-12) يقرر: 1) يواصل الاعتراف بأن استعمال الطيف في تطبيقات رصد الأرض له قيمة اقتصادية ومجتمعية كبيرة، على النحو الموصوف في الملحقين 1 و 2؛ 2) يحث الإدارات على أن تراعي المتطلبات من الترددات الراديوية في عمليات رصد الأرض، لا سيما الحاجة إلى حماية أنظمة رصد الأرض في نطاقات التردد ذات الصلة؛ 3) يشجع

الإدارات على النظر في أهمية استعمال وتيسر الطيف لتطبيقات رصد الأرض قبل اتخاذ قرارات تؤثر سلباً على تشغيل هذه التطبيقات،

وإذ تلاحظ

أ) أن القرار 73 الصادر عن قطاع تقييس الاتصالات - تكنولوجيا المعلومات والاتصالات (ICT) وتغير المناخ، يعترف بأن تكنولوجيا المعلومات والاتصالات يمكن أن تساهم مساهمة كبيرة في التخفيف من آثار تغير المناخ والتكيف معها، وأن تكنولوجيا المعلومات والاتصالات تؤدي دوراً حيوياً في مراقبة ومعالجة تغير المناخ من خلال دعم البحوث العلمية الأساسية، مما ساعد على طرح قضية تغير المناخ في المجال العام وزيادة الوعي بالتحديات المستقبلية؛

ب) أن تقرير الاتحاد الدولي للاتصالات، بعنوان 'الاتحاد الدولي للاتصالات وتغير المناخ'، يتناول تعزيز الشراكات الاستراتيجية مع مختلف وكالات الأمم المتحدة والبنك الدولي والمفوضية الأوروبية، والوكالات الدولية والوطنية والمنظمات (كوكالات الأرصاد الجوية، والفريق المعني برصد الأرض، والمنظمة الأوروبية لاستغلال السواتل المخصصة للأرصاد الجوية (EUMETSAT) والوكالة الفضائية الأوروبية (ESA) وفريق تنسيق الترددات الفضائية والوكالة اليابانية لاستكشاف الفضاء (JAXA) والإدارة الوطنية لدراسة المحيطات والغلاف الجوي (NOAA) والإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (NASA) ووكالة الفضاء الاتحادية الروسية (Roscosmos))، والمنظمات غير الحكومية وجهات القطاع الخاص المشاركة في مكافحة تغير المناخ والمعنية بالدور الذي تقوم به خدمة استكشاف الأرض الساتلية (EESS) في مراقبة تغير المناخ؛

ج) أن التقرير ITU-R RS.2178 يقدم لمحة عامة واسعة عن تطبيقات الاتصالات الراديوية المختلفة المستخدمة لرصد الأرض وأبحاث الفضاء وعلم الفلك الراديوي، ويصف وزناً المجتمع وفوائدها الاقتصادية للمجتمع العالمي، وخاصة أهميتها في مراقبة تغير المناخ والتنبؤ به والتخفيف من حدة الكوارث الطبيعية منها وتلك الناشئة عن أنشطة بشرية؛

د) أن تقرير قطاع تنمية الاتصالات، D-STG-SG02.24-2014، الذي يتناول المسألة 24/2 لقطاع تنمية الاتصالات بشأن تكنولوجيا المعلومات والاتصالات وتغير المناخ، أشار إلى الآثار الخطيرة لتغير المناخ ودور الاستشعار عن بُعد في رصده وفهم العمليات المعنية،

توصي

- 1 بأن تكون الإدارات على اطلاع بتطبيقات أجهزة الاستشعار عن بعد المحمولة على متن السواتل لدراسة تغير المناخ وأن تدرك أهميتها على النحو الموضح في الملحق 1؛
- 2 بأن تواصل الإدارات والمشغلون توفير البيانات البيئية ذات الصلة بالمناخ على النحو المشار إليه في الملحق 2؛
- 3 بضرورة التأكيد على الحماية الممنوحة للأنظمة التي تقوم بعمليات الرصد المناخي ذات الأهمية الحاسمة.

الملحق 1

استعمال أنظمة الاستشعار عن بُعد في دراسة تغير المناخ وآثاره

1 مقدمة

تستخدم المركبات الفضائية في خدمة استكشاف الأرض الساتلية بصورة رتيبة نفس الأجهزة أو أجهزة مماثلة وظيفياً لتغطية جميع أنحاء العالم. وبالتالي، فإنها توفر مجموعات بيانات على اتساق حقيقي على امتداد الكرة الأرضية. وكثيراً ما تتقاطع مجموعات البيانات هذه زمنياً على نحو يسمح ببناء مجموعات بيانات متجاوزة تمتد لعقود من الزمن. وفي حين أن قواعد البيانات هذه لا تمتد إلى قرون أو آلاف السنين، فإنها توفر بيانات حاسمة لأولئك الذين يدرسون تغير المناخ.

والسواتل هي أفضل وسيلة لتوفير لقطة تحتزل الوضع الحالي لكوننا من منظور واحد موحد. وإذا لا يمكن لأي جهاز بمفرده أو لأي مركبة فضائية بمفردها أن تقدم صورة كاملة، فإن الأسطول الحالي من المركبات الفضائية التي تعمل بالتنسيق وتبادل البيانات فيما بينها يعطينا أفضل تقييم متاح لنا للظروف العالمية. ويمكن لجهاز واحد على متن سائل مداري أن يرصد الأرض بأكملها يومياً، بينما ترصد الأجهزة المحمولة على متن السواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض باستمرار الدورة النهارية لقرص الأرض تحتها. لذلك، تشترك السواتل البيئية القطبية والسواتل المستقرة بالنسبة إلى الأرض معاً في مراقبة مستمرة تشمل العالم بأكمله.

وتخدم هذه البيانات البيئية غرضين:

- توفير أساس مرجعي لرصد وقياس تغير المناخ وآثاره على كوكب الأرض؛
- توفير مدخلات سليمة علمياً للنماذج المناخية.

ومن الضروري تحسين فهم نظام الأرض - الطقس والمناخ والمحيطات والأرض والجيولوجيا والموارد الطبيعية والأنظمة الإيكولوجية والأخطار الطبيعية وتلك التي يتسبب بها الإنسان - للتمكن على نحو أفضل من التنبؤ بالتغيرات العالمية المتوقعة وآثارها على الحضارة الإنسانية والتكيف معها والتخفيف منها.

وقد تقدمت علوم المناخ تقدماً مذهلاً من خلال عمليات الرصد الساتلي. فالمقياس الراديوي الذي حمله الساتل Explorer 7 بين العامين 1959 و 1961 مكّن القياس المباشر للطاقة الداخلة إلى الأرض والخارجة منها. فهذه البعثة الفضائية وما تبعها من بعثات مكنت العلماء من قياس توازن طاقة الأرض بثقة أكبر كثيراً بالمقارنة مع التقديرات السابقة غير المباشرة وأسفرت عن تحسين النماذج المناخية. وإذا تحسنت المقاييس الراديوية، حققت هذه القياسات الدقة والاستبانة المكانية والتغطية العالمية اللازمة للرصد المباشر للاضطرابات في ميزانية الطاقة العالمية للأرض المرتبطة بالأحداث قصيرة الأمد مثل الانفجارات البركانية الكبرى أو النينيو - التآرجح الجنوبي للمناخ (ENSO). وتقيس هذه المقاييس الراديوية مباشرة نقل النظام المناخي للحرارة من خط الاستواء إلى القطب وآثار غازات الاحتباس الحراري في الغلاف الجوي وتأثير السحب على ميزانية الطاقة للأرض. فقد عززت عمليات الرصد هذه فهمنا للنظام المناخي وحسنت نماذج المناخ.

وتوفر السواتل العاملة في مجال بحوث الغلاف الجوي (مثل AURA) والداعمة للأرصاد الجوية التشغيلية (مثل مجموعة Metop الأوروبية ومجموعة السواتل ذات المدار القطبي للإدارة الوطنية لدراسة المحيطات والغلاف الجوي (NOAA)) مجسمات يومية ثلاثية الأبعاد لدرجة حرارة الغلاف الجوي ورطوبته في جميع أنحاء العالم وكذلك البيانات المتعلقة بمكونات الغلاف الجوي الطفيفة، مثل الأوزون. وفي حين تغذي هذه البيانات نماذج التنبؤ بالأحوال الجوية، فإنها تسهم أيضاً في تحديد الحالة الراهنة للغلاف الجوي وتقدم اختباراً قصير الأجل للنماذج المناخية.

وتراقب المركبة الفضائية سمات أرضية أخرى لا علاقة لها بالمساعي المتصلة بالغلاف الجوي. فعلى سبيل المثال، يمكننا أن نخطط علماً بالملاحظات التالية:

- ترصد مجموعة المركبات الفضائية Landsat (منذ عام 1973) ومجموعة المركبات الفضائية SPOT (منذ عام 1986) سطح الأرض باستمرار منذ عقود؛
- ترصد مجموعة Numbus-7، ومن بعدها مجموعة DMSP، تركيزات الجليد البحري باستمرار منذ عام 1978؛
- ترصد السواتل ADEOS-1 و ADEOS-2 و QUIKSCAT وجهاز RapidSCAT على متن المحطة الفضائية الدولية (ISS) ومؤخراً جهاز OSCAT على متن OceanSat-2 وجهاز KU-RFSCAT على متن HY-2A وجهاز ASCAT على متن MetOp، رياح سطح البحر من وقت إلى آخر منذ عام 1996؛
- ترصد المجموعة TOPEX/Poseidon و Jason ارتفاعات ودرجات حرارة سطح البحر باستمرار منذ عام 1992؛
- ترصد السواتل SMOS و Aquarius و SMAP رطوبة التربة وملوحة المحيطات منذ عام 2009.

وتأتي مركبات فضائية وتقنيات أخرى، مثل الرادار ذي الفتحة التركيبية (SAR) وعمليات الرصد المنفعلة بالموجات الصغيرة، لتضيف إلى قدراتنا على وصف كوكبنا، لا سيما في رصد المناطق القطبية حيث يمنع ظلام الشتاء التقاط الصور الضوئية، وعلى رصد الأماكن التي يحجب فيها استمرار الغطاء السحابي سطح الأرض (مثل منطقة الأمازون وإفريقيا الوسطى والبلدان الجزرية).

ومن المتوقع أن يؤدي ارتفاع مستوى سطح البحر إلى إحداث أول أثر خطير على المجتمع بسبب تغير المناخ. ويعزى ارتفاع مستوى سطح البحر إلى ارتفاع درجات حرارة المحيطات والمياه المضافة إليها جراء ذوبان الجليد القطبي. وفي حالة ذوبان الجليد فوق غرينلاند، سوف ترتفع مستويات البحار بحوالي 7 أمتار؛ وفي حالة ذوبان الجليد فوق المنطقة القطبية الجنوبية، سوف ترتفع مستويات البحار بحوالي 70 متراً. وهناك حوالي 40% من سكان الأرض يعيشون على بُعد 100 km من ساحل البحر، وقد يتعرضون لخطر الفيضانات على المدى الطويل (مئات إلى آلاف السنين). وهناك ثمانية من أصل أكبر عشر مدن في العالم تقع على الساحل. وسوف تتأثر هذه المدن وجميع المناطق الساحلية المنخفضة بشكل خطير لو ارتفع مستوى سطح البحر بمجرد بضعة أمتار. ومن المتوقع أن يحدث ارتفاع في مستوى سطح البحر بهذا الحجم خلال القرن أو القرنين المقبلين. وتعمل الأجهزة الساتلية على قياس كل من درجة حرارة المحيطات والكتلة الجليدية، وكلاهما يسهم في ارتفاع مستوى سطح البحر.

2 الجليد أو الغلاف الجليدي

إحدى المسائل المركزية في بحوث تغير المناخ والغلاف الجليدي (المناطق الجليدية) هي كيفية تأثير الاحترار المناخي على الصفائح الجليدية. وهي مسألة هامة لأن كمية الجليد القاري ومياه الذوبان التي تصب في المحيطات تساهم بقوة في تغير مستوى سطح البحر. فقبل ظهور السواتل، اقتصرَت البيانات القطبية على البيانات المجموعة محلياً خلال المواسم المواتية. وقد ثبتت فائدة استخدام أجهزة الراديو على متن السواتل بشكل خاص في 'المناطق القطبية' والمناطق التي تطول فيها فترات الظلام خلال فصل الشتاء، حيث يتعذر الرصد في الطيف المرئي. والمشهد الإجمالي من السواتل، وخاصةً السواتل المزودة بأجهزة استشعار راديوي، قد زاد تغطية البيانات القطبية بأضعاف مضاعفة، ولم يعد توفرها وقفاً على المواسم.

فقبل ظهور السواتل، افترض أن توازن كتلة الغطاء الجليدي في القارة القطبية الجنوبية وغرينلاند مضبوط بالفرق بين معدلات ذوبان الجليد وتراكمه، وافترض ثبات معدل تصريف الجليد في المحيط، فأظهرت صور الساتل RADARSAT ما يلي:

- 1 سرعة تدفق الغطاء الجليدي متغيرة بدرجة كبيرة؛
- 2 هناك شبكات معقدة من الانسيابات الجليدية؛
- 3 ازدادت سرعة تدفق الانسياب الجليدي نحو البحر زيادة ملموسة بفعل تغير المناخ.

ومن دلائل تغير المناخ/الاحترار العالمي تراجع، بدلاً من أن تقدم، تدفقات الغطاء الجليدي (المثلجات والجليد البحري على السواء). وتظهر دراسة الأنظمة الجليدية في جميع أنحاء العالم إهدار واسع النطاق منذ أواخر السبعينات مع تسارع ملحوظ في أواخر الثمانينات. ويُستخدم الاستشعار عن بُعد لتوثيق التغيرات في امتداد الأنهار الجليدية (رقعتها) وموضع خط التوازن (الارتفاع على نهر الجليد حيث يتوازن التراكم الشتوي بالذوبان الصيفي). ومنذ عام 1972، وفرت السواتل صوراً ضوئية لامتداد الأنهار الجليدية. ويُستخدم الآن الرادار ذو الفتحة التركيبية (SAR) لدراسة مناطق تراكم الثلوج الجليدية وذوبان الجليد لتحديد العوامل المناخية المؤثرة، ويستخدم قياس الارتفاعات الليزري كذلك لقياس التغير في ارتفاع الأنهار الجليدية.

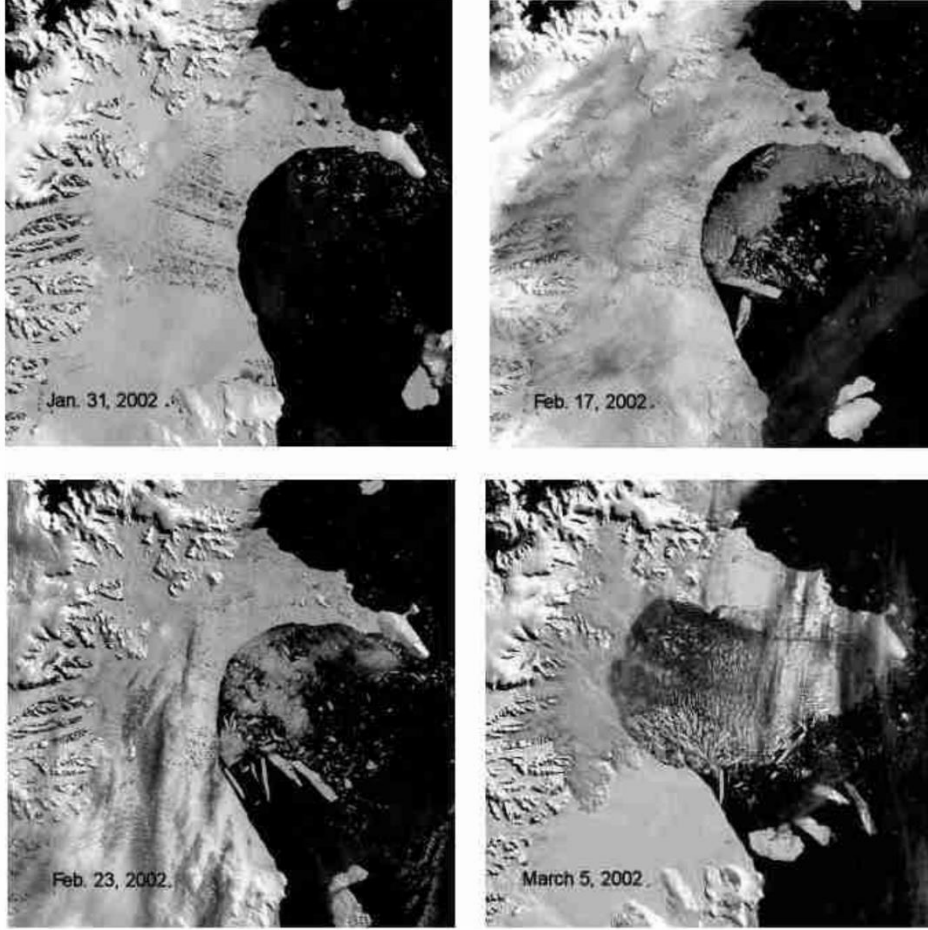
نظراً لأن المثلجات تتأثر بالتغيرات المناخية السابقة والحالية، يجري حالياً وضع جرد كامل للأنهار الجليدية العالمية لتتبع امتدادها الحالي فضلاً عن معدلات التغير في الأنهار الجليدية في العالم. وتستخدم قياسات الجليد الأرضي العالمي من مشروع الفضاء بيانات مستقاة من أجهزة الاستشعار على متن الساتلين ASTER و Landsat لجرد حوالي 160 000 نهر جليدي في جميع أنحاء العالم. وتعد القياسات وتحليل الاتجاهات الناشئة مؤشرات هامة لتغير المناخ ومثالاً على قيمة وأهمية مجموعات البيانات على المدى الطويل لفهم النظام المناخي المعقد.

وتسهل مراقبة الصفائح الجليدية بالأجهزة المحمولة في الفضاء، الفاعلة منها والمنفعلة. فقد رُصدت حالات تحطم الصفائح الجليدية الكبرى (مثل الجرف الجليدي لارسن باء) في القطب الجنوبي من الفضاء. وإن لم يكن هذا التحطم يعزى إلى ظاهرة الاحتباس الحراري، فقد تسارعت وتيرته من جرائها. ولم يتسنَ تصوير أخيار الجرف الجليدي لارسن باء في القارة القطبية الجنوبية في عام 2002 إلا بفضل التغطية المتكررة من الصور الساتلية. وقد بيّنت الصور بوضوح كبير ديناميات الصفائح الجليدية في مقاييس زمنية مذهشة بقصرها (الشكل 1). وتحمل هذه الكشوف الجديدة مضامين ذات ثقل مفادها أن الانتقال السريع للجليد من الصفائح الجليدية القارية إلى البحر يمكن أن يؤدي إلى ارتفاع كبير في مستوى سطح البحر.

ويمكن أيضاً رصد الشقوق الكبيرة في الطبقات الجليدية في القطب الجنوبي من الفضاء. وقد أثبتت الرصدات الصيفية الروتينية في منطقة القطب الجنوبي، من خلال التوليف بين الصور البصرية التي يلتقطها النظام Copernicus Sentinel-2 ومخرجات الرادار Sentinel-1، قيمتها في رصد التغير البيئي السريع وتوفير المعلومات حاسمة الأهمية لاتخاذ القرارات المستنيرة بشأن مسائل السلامة والأمن في المنطقة القطبية الجنوبية.

الشكل 1

انهيار الجرف الجليدي لارسن باء في غرب المنطقة القطبية الجنوبية
تفكك 2 000 km² من الجرف الجليدي في مجرد يومين إلى أجزاء صغيرة من الجليد



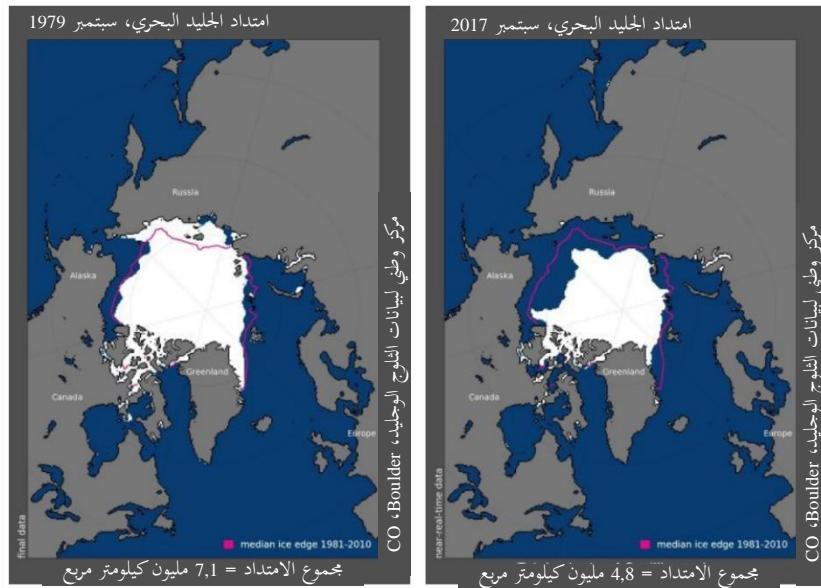
RS.1883-01

ويتشكل الجليد البحري من تجمد مياه المحيط، سواء على طول السواحل أو نحو قاع البحر (جليد سريع) أو يطفو على السطح (انسياء جليدي) أو يتراس (جليد متراس). وأكبر مناطق الجليد المتراس هي كتل الجليد المتراس القطبية. ونظراً للكميات الهائلة من المياه التي تضاف إلى المحيطات والغلاف الجوي أو تزال منهما، يكون لسلوك الكتل الجليدية القطبية أثر كبير على التغيرات العالمية في المناخ. وقد جرى، منذ عام 1979، رصد الجليد البحري باستمرار بواسطة أجهزة الاستشعار المنفصلة العاملة بالموجات الصغيرة (المقياس الراديوي الماسح كهربائياً بالموجات الصغيرة (ESMR) والمقياس الراديوي متعدد القنوات الماسح بالموجات الصغيرة (SMMR) وجهاز التصوير/الاستشعار بالموجات الصغيرة الخاص (SSM/I) والمقياس الراديوي المتقدم الماسح بالموجات الصغيرة - نظام رصد الأرض (AMSR-E)). وإذ لا تعوق ظروف الطقس أو مستويات الضوء عمل هذه الأجهزة، فهي مناسبة لمراقبة الجليد البحري بسبب التباين الشديد في انبعاثات الموجات الصغيرة بين المحيطات المكشوفة وتلك المغطاة بالجليد. وقد مكنت مجموعات البيانات طويلة الأجل الممتدة لمدة 35 عاماً أجهزة الاستشعار المنفصلة هذه العاملة بالموجات الصغيرة من تحليل الاتجاه السائد بما يتجاوز تقلبات الجليد البحري بين سنة وأخرى. ومنذ عام 2000، رُصدت كميات قياسية دنيا من الجليد خلال الصيف في أربع من السنوات الست الماضية في منطقة القطب الشمالي (انظر الشكل 2). وعلاوة على ذلك، تبين المؤشرات الأخيرة أن امتداد الجليد في فصل الشتاء أخذ بالانحسار بمعدل أسرع، ربما نتيجة لارتفاع درجة حرارة المحيطات المرتبطة بغطاء جليدي أرق وأقل اتساعاً، كما هو مبين في الشكل 3. ويبلغ معدل الانخفاض الخطي لشهر فبراير 46 900 كيلومتر مربع سنوياً، أو 3 في المائة لكل عقد من السنين. وتؤثر ظاهرة ذوبان الجليد وتجمده (الجليد البحري والجليد البري على السواء) أيضاً على ملوحة المحيط وترتبط

ملوحة سطح البحر (SSS) بالتغير في مستوى سطح البحر على الصعيد الإقليمي. وعمليات الرصد هذه لتقلص جليد البحر القطبي الشمالي متسقة مع توقعات النماذج المناخية للاحتراز الزائد في خطوط العرض العالية، وتعتمد هذه النماذج بدورها في جزء كبير منها على قدرة الجليد على عكس أشعة الشمس الهابطة عليه. وعلى النقيض من القطب الشمالي، ولم يُكتشف أي اتجاه واضح في مدى التغطية الجليدية لبحر القطب الجنوبي.

الشكل 2

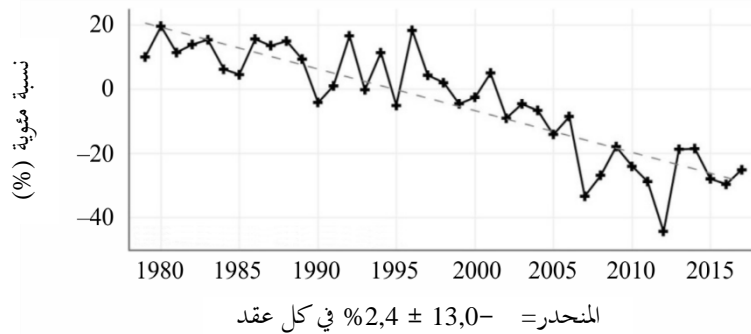
امتداد الجليد البحري في القطب الشمالي في سبتمبر 1979 و2017
يبين الخط الأحمر متوسط امتداد الجليد لشهر سبتمبر من 1981 إلى 2010



RS.1883-02

الشكل 3

شدوذ امتداد الجليد البحري في سبتمبر، من 1979 إلى 2017



RS.1883-03

وعلى مدى السنوات القليلة الماضية، كان هناك عدد متزايد من تقارير التنبؤ بأحوال الجليد البحري. وتستند هذه التقارير كليا أو في الغالب إلى بيانات من السواتل. فعلى سبيل المثال، خلص تقييم أثر المناخ القطبي (ACIA 2005) إلى أن الانحسار المستمر في جليد البحر القطبي الشمالي قد يؤدي قريباً إلى قطب شمالي خال من الجليد موسمياً وزيادة حركة النقل البحري لأن طرق الشحن عبر المحيط المتجمد الشمالي أقصر بكثير من الطرق عبر قناة بنما أو قناة السويس. ولكن هناك أيضاً بعض الأدلة على أن انحسار الغطاء الجليدي سيتوافق بقدر أكبر من التباين بين سنة وأخرى في بعض المناطق على الأقل.

ويُعتبر فهم تغيرات الطارئة على الصفائح الجليدية والجليد البحري والغطاء الجليدي والمثلجات هاماً لفهم تغير المناخ العالمي والتنبؤ بآثاره. وعلى وجه الخصوص، فقد حُدد "تقلص الصفائح الجليدية" ومساهمته في ارتفاع مستوى سطح البحر بأنه "احتراق العام" الثالث من حيث الأهمية عام 2006 وفقاً لـ 'العلوم'. ونظراً لتغير المناخ المتوقع وما يرتبط به من ارتفاع لمستوى سطح البحر، فإن تيسر التغطية الساتلية القطبية العالمية في المستقبل سوف يخدم احتياجات المجتمع الحاسمة التي لا يفني بها أي نظام آخر للرصد.

3 المحيطات

تغطي المحيطات حوالي 71% من سطح الكرة الأرضية، وتؤدي دوراً رئيسياً في النظام المناخي في نواح عدة. وهي أيضاً مؤشر ممتاز لتغير المناخ. فعلى سبيل المثال، يكشف قياس مستويات سطح البحر عن مؤشرات بالغة الأهمية بشأن ظاهرة الاحتباس الحراري.

وتشكل التغيرات في الطقس والمناخ والبيئة تحديات خطيرة للبشرية. وتتطلب مواجهة هذه التحديات المزيد من التحسينات في مجال التنبؤات الجوية، وخاصة في التوقعات على المديين المتوسط الطويل. فإذا كانت هناك صورة أوضح لما سيحدث في الأيام العشرة المقبلة أو في الأشهر المقبلة أو حتى في الموسم المقبل، يمكن للناس والصناعات إعداد أنفسهم على نحو أفضل بكثير بالنسبة إلى أنماط الطقس غير المستقر. وتقتضي مواجهة هذه التحديات أيضاً فهماً أفضل للعوامل المناخية العالمية التي تسبب مثل هذه الظواهر مثل ظاهرة النينو والنينيا في المحيط الهادي والأعاصير والأنواء البحرية الخطيرة، وارتفاع مستويات مياه البحر خاصة.

ولا سبيل للاهتمام إلى فهم القوى الكامنة وراء تغير أنماط الطقس إلا برسم خرائط التغيرات في ظروف سطح المحيطات في جميع أنحاء العالم وذلك باستخدام البيانات التي تم جمعها لوضع وتشغيل نماذج قوية لسلوك المحيط. فبالجمع بين نماذج المحيطات والغلاف الجوي، يمكننا تقديم التوقعات الدقيقة المطلوبة على المديين القصير والطويل معاً. وثمة حاجة إلى اقتران نماذج المحيطات والغلاف الجوي كي تؤخذ ديناميات المقياس المتوسط للمحيطات في الاعتبار تماماً. ويصبح اقتران هذه النماذج هاماً للتنبؤ بالأحوال الجوية لما بعد أسبوعين. وتُعتبر المحيطات أيضاً جزءاً هاماً من عملية تغير المناخ، فمن المعروف على نطاق واسع أن ارتفاع مستويات مياه البحر في العالم بأسره هو إحدى العواقب المحتملة الأوضح لظاهرة الاحتباس العالمي.

1.3 درجة حرارة سطح البحر ومتوسط ارتفاع مستوى سطح البحر

قُدمت مساهمة هامة لعلم المناخ بالسجل طويل الأجل لدرجة حرارة سطح البحر (SST) من المقياس الراديوي المتقدم ذي الاستبانة العالية جداً (AVHRR) الطائر على متن مجموعة سواتل الرصد التلفزيوني بالأشعة تحت الحمراء (TIROS-N) ومجموعة سواتل NOAA. كما تقاس حرارة سطح البحر الآن بأجهزة الموجات الصغرية المنفعلة. وتُعتبر حرارة سطح البحر من أهم مؤشرات تغير المناخ العالمي ومعلمة حيوية لنمذجة المناخ. ونظراً لكون سجل بيانات حرارة سطح البحر الأطول بين بيانات دراسة المحيطات في الاستشعار عن بُعد، فإن أثره واسع النطاق.

وقد كشف سجل حرارة سطح البحر دور المحيط في تغير المناخ الإقليمي والعالمي وكشف عن تفاصيل مهمة حول تيارات المحيطات. وتحتزن المحيطات أكثر من 80% من إجمالي تدفئة نظام الأرض، وتعمل تيارات المحيطات على إعادة توزيع هذه الحرارة في جميع أنحاء العالم. وقد ساعد تحليل اتجاهات سجل بيانات حرارة سطح البحر على تحسين فهم التأثيرات التفاعلية للمناخ والغلاف الجوي في المناطق المدارية المسؤولة أيضاً عن أحداث التذبذب الجنوبي لظاهرة النينو (ENSO) في المحيط الهادئ. وكان للتقدم الحاصل في فهم هذا التذبذب، جراء الرصد الساتلي للرياح السطحية في البحر وارتفاعات ودرجات حرارة سطح البحر، أن أثر تأثيراً عميقاً على التنبؤات بالمناخ والطقس إقليمياً. وعلاوة على ذلك، رُبطت شدة الأعاصير البحرية بدرجات حرارة سطح البحر. وبالتالي، استفادت كل من درجات حرارة سطح البحر والأعاصير نفسها من الدراسات التي تستخدم بيانات من السواتل.

وبالإضافة إلى ذلك، فإن سجل حرارة سطح البحر هو في صلب اقتران المحيط والغلاف الجوي وهو عامل الضبط في تبادل الحرارة والبخر بينهما. ويقيم تحليل اتجاهات سجل بيانات حرارة سطح البحر الدليل على ظاهرة الاحتباس الحراري والتأثير التفاعلي الهام في المناطق المدارية المسؤول أيضاً عن أحداث التذبذب الجنوبي لظاهرة النينو (ENSO). وهذا الرصد لحرارة سطح البحر بالاقتران

مع القياسات الموضعية الرأسية لدرجات الحرارة في المحيط على عمق 3 000 متر، يوفر أدلة للكشف عن ظاهرة الاحترار العالمي في المحيط الناشئة عن أنشطة بشرية.

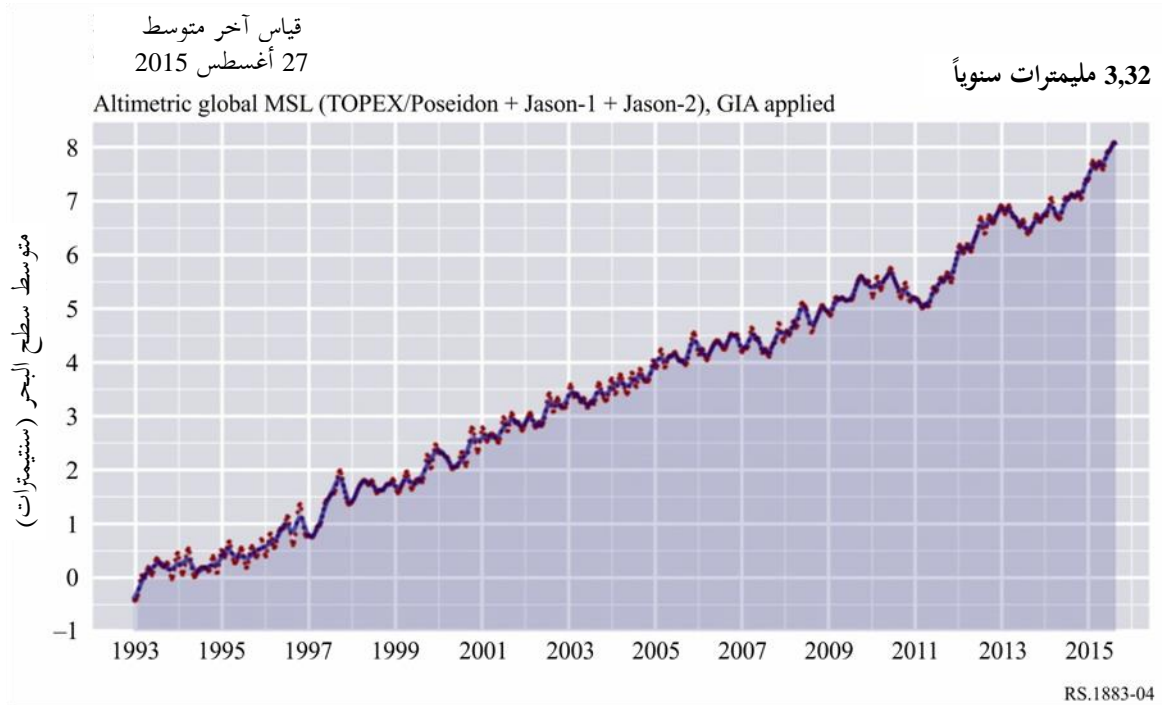
كما أن لفهم ارتفاع حرارة سطح البحر والمدخلات الحرارية الناجمة عن أنشطة بشرية، مفاعيل هامة على قياس ارتفاع مستوى سطح البحر والتنبؤ به. إذ إن ارتفاع مستوى سطح البحر قد يكون علامة على ارتفاع درجة حرارة الأرض. ومراقبة هذا المستوى هو من تطبيقات قياس الارتفاعات، وهو إحدى القضايا الرئيسية في العلوم البيئية للقرن الحادي والعشرين.

ويصعب كثيراً فصل التقلبات الطبيعية للمناخ عن آثار الاحتباس الحراري. وقد استُمدت قياسات مستويات سطح البحر على مدى 15 عاماً من عمليات الرصد الساتلي التي ظلت متسقة وأنتجت سلسلة زمنية دقيقة لعمليات الرصد الساتلي. ومع ذلك، فإن مثل هذه الفترة الزمنية قصيرة. وبالإضافة إلى ذلك، تدعو الضرورة إلى بيان ما يضيفه الاضطراب بفعل الإنسان إلى تقلبات المناخ الطبيعية. لذلك، يتعذر الكشف عن إشارات تغير المناخ إلا إذا فاقَت التقلبات الطبيعية في الخلفية. وينطوي كشف تغير المناخ العالمي على أكثر بكثير مما تتطلبه مراقبة التأثيرات الإقليمية.

ويعود الارتفاع المرصود في مستوى سطح البحر في جانب منه إلى تزايد درجة حرارة المياه. ويمكن أن يعود الباقي إلى ذوبان الثلجات والتقلبات في مستوى المياه القارية. ويبين الشكل 4 أن الارتفاع يبلغ حوالي 3,3 ميليمتر سنوياً، أي ما يقرب من 5 سنتيمترات في غضون 15 عاماً.

الشكل 4

متوسط ارتفاع مستوى سطح البحر



المصدر: © CNES, LEGOS, CLS

يبد أن متوسط الارتفاع في مستوى سطح البحر ليس سوى جزء من القصة. فارتفاع مستوى المحيطات بعيد كل البعد عن كونه موحدًا. وفي بعض مناطق المحيطات ارتفع مستوى سطح البحر (بنسبة تصل إلى 20 mm في السنة في بعض الأماكن)، فيما هبط في مناطق أخرى بمقدار مماثل. وهذه الاختلافات الإقليمية التي رصدها الساتلان TOPEX/JASON منذ عام 1993، تعكس في الغالب تقلبات مستوى سطح البحر على مدى عدة سنوات.

ويتمثل أحد بواعث القلق الرئيسية في إمكانية أن يغمر ارتفاع مستويات مياه البحر المناطق الساحلية في جميع أنحاء العالم، وأن يُغرق تماماً الجزر المنخفضة. وبينما يُتوقع لهذا الأثر أن يكون ذا شأن على نطاق زمني مديد نسبياً (عقود وقرن)، فإن الطبوغرافيا المستمدة من الرصد الساتلي (رصد الرادار ذي الفتحة التركيبية (SAR) كبعثة الطبولوجيا الرادارية لمكوك الفضاء، والرصد البصري TerraSAR-X بواسطة الساتل ASTER) يمكن أن تساعد من خلال تحديد المناطق المعرضة للخطر.

ولم يقتصر ما أظهرته قياسات درجة حرارة سطح البحر على معلومات هامة حول تيارات المحيطات (مثل تيار الخليج)، بل ارتقت أيضاً ببحوث المناخ إذ قدمت معلومات تفصيلية عن مدخلات الحرارة في المحيطات. وقد أدى الجمع بين لون المحيط ورصد درجة حرارة سطح البحر (SST) إلى اكتشافات جديدة بشأن الاقتران الفيزيائي البيولوجي في المحيط، مع ما لذلك من مدلولات هامة لدور المحيطات في الدورة الكربونية.

ويقدم الرصد الساتلي الوسيلة الوحيدة لتقدير دور الكتلة الحيوية للمحيط ومراقبتها بوصفها بالوعة للكربون. وعلى وجه الخصوص، لا يمكن تناول السؤال الأساسي عما إذا كان امتصاص الكربون البيولوجي يتغير استجابة لتغير المناخ سوى بالقياسات الساتلية. فهو لا يتطلب قياسات لون المحيط (الكتلة الحيوية للعوالق النباتية والإنتاجية) فحسب، بل أيضاً تطابق عمليات الرصد الفضائية لبيئة المحيطات الفيزيائية (الدوران والاختلاط) والتبادلات بين اليابسة والمحيطات (عن طريق الأنهار ومد الأراضي الرطبة) وعوامل أخرى مثل الرياح والمد والجزر ومدخلات الطاقة الشمسية إلى المحيط العلوي. ويعد رصد الروابط بين البيئة الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للمحيطات إنجازاً كبيراً للرصد من الفضاء.

2.3 رطوبة التربة وملوحة المحيطات

عادة ما يحدث التبخر والتسرب وإعادة حقن المياه الجوفية من خلال نطاق الفادوز غير المشبع الذي يمتد من أعلى سطح الأرض إلى المياه الجوفية. وتقع منطقة الجذر من الغطاء النباتي، حيث يرتوي النبات، ضمن نطاق الفادوز الذي يشكل واجهة التماس بين النباتات والنظام الهيدرولوجي. وتتحكم كمية المياه المتوفرة ضمن النبات في نتج النبات والتمثيل الضوئي وبالتالي امتصاص ثاني أكسيد الكربون. كما أن كمية المياه في نطاق الفادوز ترتبط ارتباطاً مباشراً بقدرة التربة على الاستنزاب بعد هطول الأمطار. وقد صُممت مخططات نقل التربة والغطاء النباتي والغلاف الجوي (SVAT) المستخدمة في الأرصاد الجوية والهيدرولوجيا لوصف عمليات التبخر الأساسية على السطح وتقسيم المياه بين نتج النباتات والاستنزاب والجريان السطحي ومحتوى التربة من الرطوبة. ويجب توفير قيمة واقعية أولية لكمية المياه في نطاق الفادوز لنماذج نقل التربة والغطاء النباتي والغلاف الجوي.

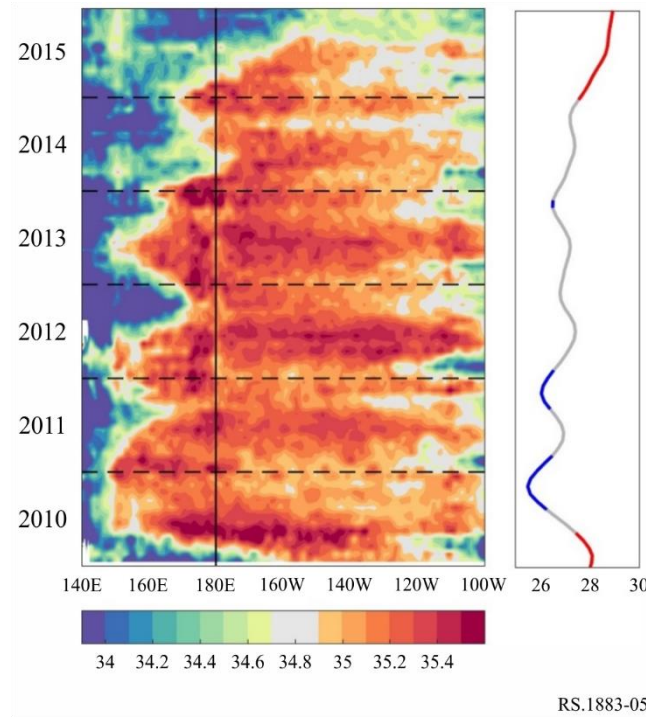
وعند التعامل مع تربة جرداء أو تربة تتأثر عليها نباتات متفرقة، يمكن حساب معدل التبخر والجريان السطحي من سلسلة الوقت لرطوبة التربة السطحية. أما عند التعامل مع السطوح المغطاة بالنباتات، فلا بد من تؤخذ كمية المياه في النباتات (العمق البصري للنباتات) في الحسبان. ويمكن أن يكون العمق البصري للنباتات نفسه منتجاً مفيداً جداً لمراقبة ديناميات الغطاء النباتي.

وتتسم معرفة توزيع الملح (الملوحة) في المحيط العالمي وتقلباته السنوية وما بين سنة وأخرى أموراً بأهمية حاسمة في فهم دور المحيطات في النظام المناخي. والملوحة أساسية في تحديد كثافة المحيط، وبالتالي الدوران المدفوع بالتباين الحراري والملحي في المحيط. كما ترتبط ملوحة المحيط بدورة الكربون في المحيطات كونها تقوم بدور في إرساء التوازن الكيميائي الذي ينظم بدوره امتصاص غاز ثاني أكسيد الكربون وإطلاقه. ولذلك فإن استيعاب قياسات الملوحة على سطح البحر ضمن النماذج البيولوجية الجغرافية الكيميائية ينبغي أن يحسن تقديرات امتصاص المحيطات لغاز ثاني أكسيد الكربون.

وتختلف ملوحة سطح المحيط من منطقة لأخرى في العالم، وذلك تبعاً لاختلاف التوازن بين التبخر وهطول الأمطار والجريان السطحي للأنهار، وكذلك تبعاً لاختلاف ديناميات المحيطات. ويوفر ساتل قياس رطوبة التربة وملوحة المحيط (SMOS)، الذي أطلق في عام 2009، أطول سجل مستمر لقياسات ملوحة سطح البحر من الفضاء. وقد حصل الساتل على رصدات ملوحة سطح البحر في أوائل عام 2010 حيث كانت تتلاشى ظاهرة 'النينيو' الضعيفة وانقلبت إلى ظاهرة 'النينيا' القوية، التي استمرت حتى عام 2012. ولوحظت أحوال ملوحة أقل من المعتاد في أوائل عام 2010 في المحيط الهادئ الاستوائي، حيث امتدت مياه غرب المحيط الهادئ العذبة نحو الشرق. وتراجعت هذه المياه غرباً عندما استقرت ظاهرة النينيا. ولاحظ ساتل قياس رطوبة التربة وملوحة المحيط (SMOS) مؤخراً ارتفاعاً في المياه العذبة في المحيط الهادئ المداري أثناء حدث النينيو عام 2016 (انظر الشكل 5).

الشكل 5

الملوحة عند خط الاستواء: متوسط ملوحة سطح المحيط حول خط الاستواء (2°N - 2°S) من 2010 إلى 2015. تمتد المياه العذبة (باللون الأزرق والأخضر) في غرب المحيط الهادي الاستوائي شرقاً أثناء أحداث النينو (أوائل 2010 و 2015) وتراجع إلى الغرب أثناء أحداث النينيا (نهاية 2010 و 2011). إلى اليمين: 'مؤشر نينو 3.4'، استناداً إلى رصدات درجة حرارة سطح البحر، يشار إلى أحداث النينو باللون الأحمر وإلى أحداث النينيا باللون الأزرق



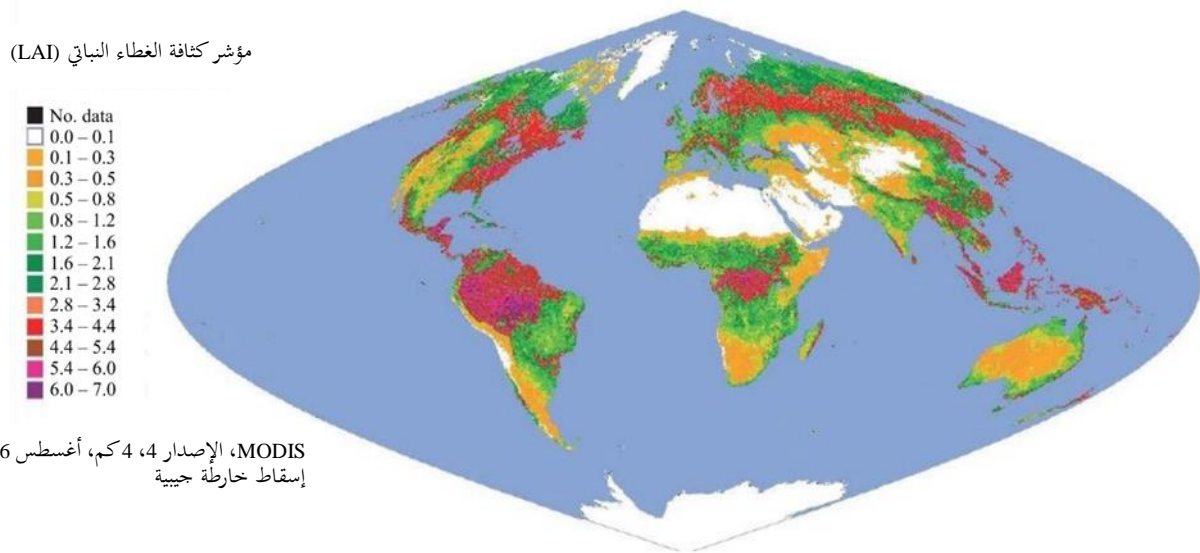
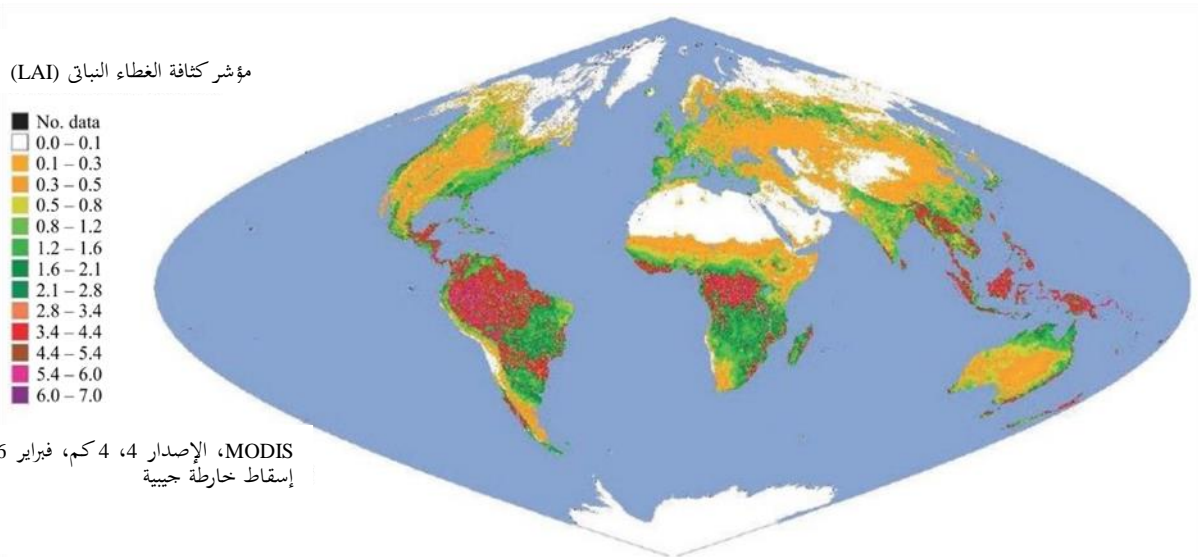
وتتولى بعثة الساتل SMOS رصد رطوبة التربة، إلى جانب بعثة الساتل SMAP ورصد ملوحة مياه المحيطات، إلى جانب بعثة الساتل Aquarius.

4 الغلاف الحيوي

لا بد من المراقبة الساتلية لديناميات الغطاء النباتي للأرض من أجل فهم أداء النظام البيئي العالمي والاستجابة لتقلبات المناخ وتغيره. وبفضل مقياس الطيف التصويري المتوسط الاستبانة (MODIS) على متن الساتلين TERRA و AQUA والمقياس VIIRS على متن الساتل SUOMI NPP صار هذا الرصد (الشكل 6) أدق بتوسيعه ليشمل القياس الحيوي الفيزيائي.

الشكل 6

مؤشرات الورقة الخضراء من مقياس الطيف التصويري المتوسط الاستبانة (MODIS)
تُظهر التغيرات الموسمية في النباتات



RS.1883-06

المصدر: رصد الأرض من الفضاء: السنوات الخمسون الأولى من الإنجازات العلمية، ص. 75، 2008، يمكن تحميله من الرابط:

<http://www.nap.edu/catalog/11991.html>

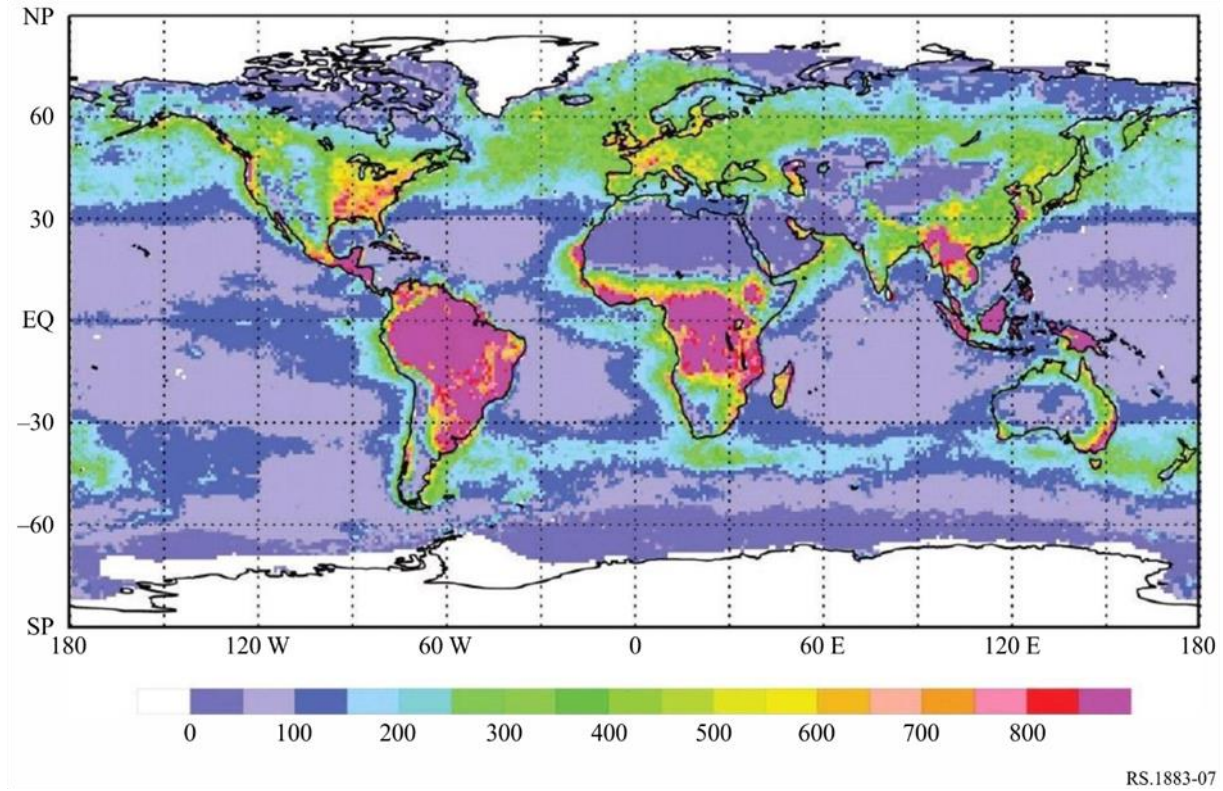
وقد استفادت دراسات التغير المناخي من البحوث الساتلية في دورة الكربون وتقلبات الطاقة في الأرض.

وتُعرّف الإنتاجية الأولية الصافية (NPP) على أنها صافي تدفق الكربون من الجو إلى النباتات الخضراء في وحدة الزمن. ويقدم الرصد الساتلي للإنتاجية الأولية الصافية مساهمات قيمة للفهم الأساسي لآثار تغير المناخ على الغلاف الحيوي. وتتأثر الإنتاجية الأولية الصافية بضوابط مناخية وحيوية تتفاعل مع بعضها البعض. وتكاد تتساوى مساهمة الأرض والمحيطات في الإنتاجية الأولية الصافية (الشكل 7)، ولكن هناك تفاوتاً لافتاً في هذه الإنتاجية على المستوى المحلي. ونظراً لأن دورات حياة العوالق النباتية أقصر بكثير من أعمار النباتات البرية (أيام مقابل سنوات أو عقود)، فإن العوالق النباتية قد تستجيب لتأثيرات المناخ على الدوران والاختلاط

وتوريد المواد الغذائية والضوء في المحيطات بسرعة أكبر بكثير من النباتات في الأنظمة البيئية الأرضية. ومن ثم، فإن المكون المحيطي للدورة الكربونية (النصف تقريباً) يُتوقع أن يستجيب بسرعة أكبر لتغيرات المناخ.

الشكل 7

الإنتاجية الأولية الصافية (NPP) العالمية السنوية (بوحدة غرامات الكربون في المتر المربع سنوياً) للغلاف الحيوي، محسوبة من نموذج الإنتاج المعمم رأسياً (CASA-VGPM) وبيانات الدخل للون المحيط من جهاز استشعار الماسحة اللونية للمناطق الساحلية (CZCS) هي متوسط القيم بين العامين 1978 و 1983. مؤشر الغطاء النباتي للأرض من أجهزة استشعار المقياس الراديوي المتقدم ذي الاستبانة العالية جداً (AVHRR) هو متوسط القيمة بين العامين 1982 و 1990



أطلقت الماسحة اللونية للمناطق الساحلية عام 1978، وأظهرت إمكانية رصد إنتاجية المحيط بواسطة النطاقات المرئية والقريبة من تحت الحمراء، غير أن قياسات هذه الماسحة كانت مشبعة على الأرض وبالتالي غير صالحة للاستعمال.

وقد حصل المقياس الراديوي المتقدم ذو الاستبانة العالية جداً (AVHRR)، المركب على متن سواتل رصد الأحوال الجوية ذات المدار القطبي للإدارة الوطنية لدراسة المحيطات والغلاف الجوي (NOAA)، على سجل مستمر من الرصد العالمي اليومي منذ عام 1978 بواسطة النطاقات الحمراء والقريبة من تحت الحمراء على السواء. وتمتد بيانات المقياس الراديوي المتقدم ذو الاستبانة العالية جداً (AVHRR) اليومية الآن لأكثر من 25 عاماً، وهي أطول سجل عالمي مستمر متوفر عن إنتاجية الأرض والفينولوجيا (دراسة الوقائع الدورية لدورة حياة النبات والحيوان وكيف تتأثر بالتغيرات الموسمية والتغيرات بين سنة وأخرى في المناخ) وتغيير النظام البيئي، من أجل مراقبة استجابات الغلاف الحيوي لتغير المناخ وتقلبه.

ورغم أن المقياس الراديوي المتقدم ذو الاستبانة العالية جداً (AVHRR) ليس مصمماً لمراقبة المناخ، فقد أنتج استمرار التحسن في المعايرة وإعادة التحليل سجلاً متسقاً لمراقبة وتقييم استجابات الغلاف الحيوي الماضية والمقبلة من جراء تغير المناخ وتقلبه والأنشطة البشرية.

ومن دواعي القلق الكبرى تأثير تغير المناخ على الزراعة. فمع ارتفاع درجة حرارة المناخ، يطول موسم الزراعة وتصبح المناطق الشمالية أكثر إنتاجية بينما تقل إنتاجية المناطق الجنوبية التي تواجه القيط. وقد رُوِّقَت الإنتاجية الزراعية من الفضاء منذ عقود. ويتراوح مؤشر الغطاء النباتي ذو الفرق الموحد (NDVI) بين -1 و+1 حيث يتخذ قيمةً تناهز +1 عندما تُرصد النباتات الخضراء. ومن الناحية التقنية، فإن مؤشر الغطاء النباتي ذو الفرق الموحد هو المعطى القريب من الأشعة تحت الحمراء ناقصاً معطى الأشعة الحمراء (المرئية) مقسوماً على مجموعهما.

وفي العقد الماضي، أصبحت بيانات مؤشر الغطاء النباتي ذو الفرق الموحد (NDVI) من المقياس الراديوي المتقدم ذي الاستبانة العالية جداً (AVHRR) مكوناً حاسماً في مراقبة تغير المناخ وتقييم تغير طول وتوقيت موسم الزراعة ومراقبة حالة الغلاف الحيوي والظواهر الأخرى المرتبطة بالنظام البيئي. وقد كشفت سجلات مؤشر الغطاء النباتي ذو الفرق الموحد طويلة الأجل ارتفاع قيمة هذا المؤشر في استجابة لاحتارار المناخ خلال الثمانينيات وأوائل التسعينات، بيد أن هذا الاتجاه عاد وأخذ منحىً مستقراً في الآونة الأخيرة. وارتبطت تغيرات هذا المؤشر (الاحضرار) على مستوى الكوكب ارتباطاً قوياً مع الديناميات اليومية لإشعاع التركيب الضوئي الأرضي الفاعل الملتقط وتركيزات غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. ويتناسب المؤشر تناسباً عكسياً قوياً مع غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي بحيث يكون عالياً عند انخفاض تركيزات الغاز والعكس بالعكس. ويبين هذا النمط الزمني في عملية التركيب الضوئي والتنفس في النظام البيئي الاقتران الدينامي بين الغلاف الحيوي والغلاف الجوي.

ويدعم ارتفاع معدل معاودة زيارة سواتل النظام Sentinel-2 محاولات التخفيف من إزالة الغابات من خلال توفير الفرص للحصول على بيانات صور خالية من الغيوم. وسيكون لذلك فائدة خاصة في خطوط العرض الاستوائية، حيث يمكن أن يؤخر الغطاء السحابي الثقيل الحصول على مجموعة كاملة من البيانات. ويمكن أن تدعم البيانات عالية الاستبانة الكشف عن تغير أحداث الفيضانات في البلدان المتأثرة.

5 تغير المناخ والتدخل البشري على المستوى الإقليمي

لا يحدث تغير المناخ بشكل متجانس - أي أن كوكب الأرض ككل لا يسخن بشكل منتظم. إذ يحدث تغير المناخ عادةً على المستوى الإقليمي حيث ترتفع حرارة بعض المناطق أكثر من غيرها، وقد تُظهر بعض المناطق قدراً من التبريد على المدى القصير. وتعرض بيئة كوكب الأرض للإجهاد بسبب الزيادة في عدد السكان. ويؤثر العديد من الإجراءات المتخذة لدعم هذه الزيادة على المناخ، محلياً وعالمياً على السواء، ويمكن رصدها بواسطة الأجهزة المحمولة على متن السواتل.

ومن أمثلة ذلك ما حدث عندما تم تحويل نهر آمو داريا في الستينيات لري حقول القطن والقمح. وبعد عقود من الزمان، كاد بحر آرال، الذي كان في وقت مضى رابع أكبر بحيرة في العالم بمساحة 68 000 كيلومتر مربع، أن يجف تماماً (الشكل 8). وانهارت صناعة صيد الأسماك المحلية، التي كانت توفر سدس محصول الأسماك في الاتحاد السوفيتي. ولدى انحسار السواحل بضعة كيلومترات عن البلدات، تعرض من تبقى من السكان لآفة العواصف الترابية السامة. وأصبح انكماش بحر آرال يُعرف بأنه واحد من أسوأ الكوارث البيئية على الكوكب.

الشكل 8

المساحة التاريخية لبحر آرال



1977 (Landsat-2)



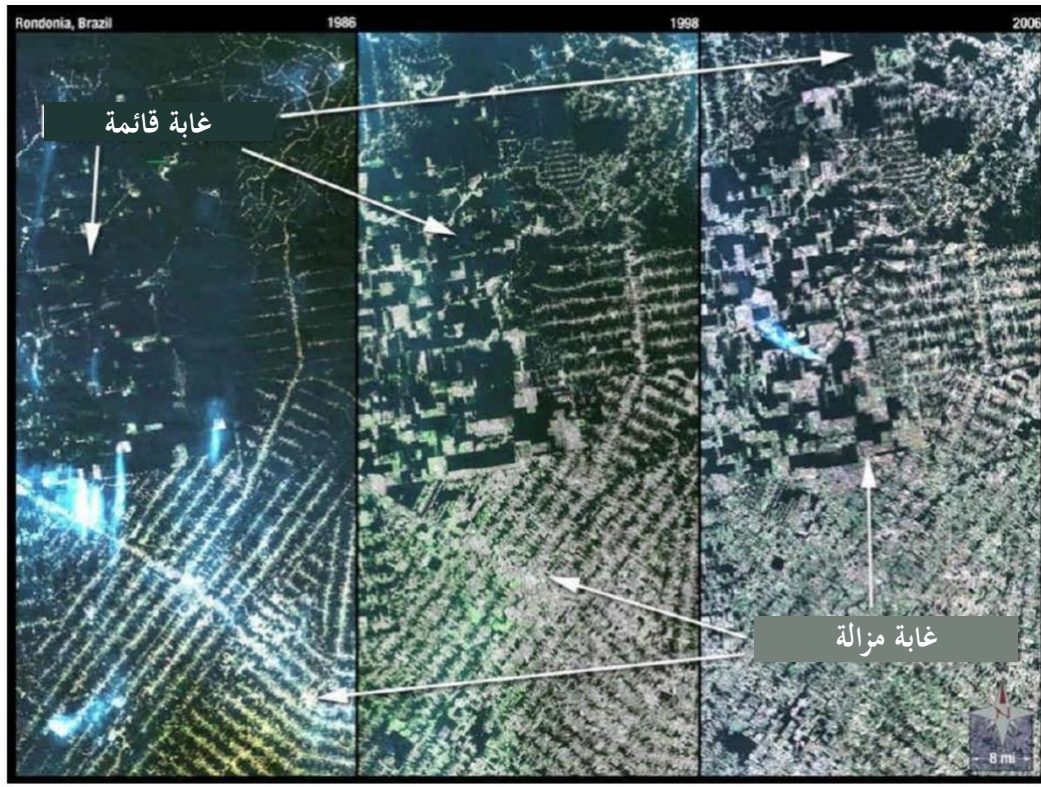
2014 (MODIS on TERRA)

RS.1883-08

وتعمل الأحراج بمثابة مرشحات للهواء، حيث تزيل ثاني أكسيد الكربون من الهواء وتزودنا بالأكسجين والماء. والسواتل قادرة على رصد صحة الغابات وامتداد رقعتها. وقد تم تحديد المناطق التي أزيلت الغابات فيها (الشكل 9) وكذلك المناطق التي تعافت فيها الغابات (الشكل 10). وفي كلا الشكلين استخدمت بيانات Landsat. وتؤثر التغيرات الطويلة الأجل في مجمل الغطاء الحرجي على المناخ وينبغي رصدها.

الشكل 9

إزالة الغابات في الأمازون



RS.1883-09

الشكل 10

إزالة الغابات وتعافيا

تغطية الأشجار بواسطة Landsat، أوريجون (شمال غرب الولايات المتحدة)



2000

2005

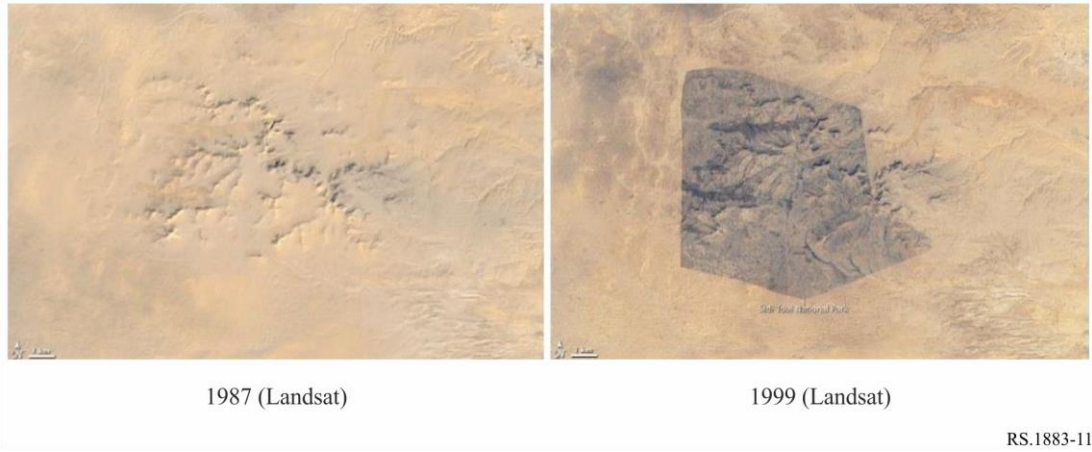
2000-2005

RS.1883-10

ولا يقتصر أثر الزحف الصحراوي على الأراضي المزروعة على الإمدادات الغذائية والأراضي المتاحة للسكن البشري فحسب، بل يؤثر التغير في بياض كوكب الأرض بسبب نقص الغطاء النباتي على مناخ الأرض أيضاً. ويمكن أن يؤثر رعي المواشي بشكل خطير على البيئات المجردة، ولا سيما الصحاري. ويمكن للماعز أن يقضي على حياة النباتات الصحراوية الحرجة أصلاً، بينما يمكن تحقيق تعافي البيئة بمجرد إقامة سياج لإبعاد هذه الحيوانات (انظر الشكل 11).

الشكل 11

تعاقي الحديقة الوطنية في سيدي الطوي (تونس)

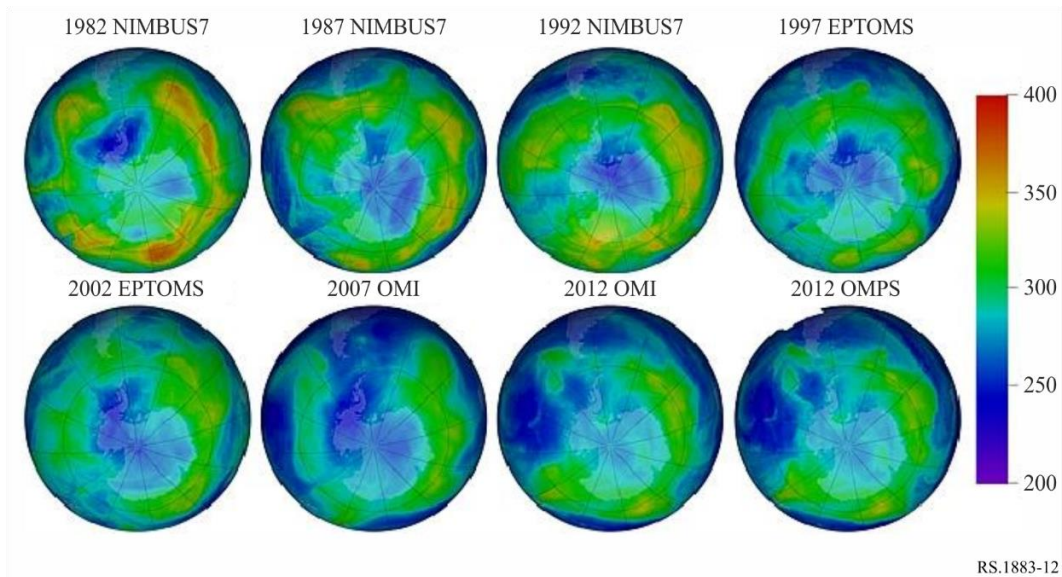


وبحلول عام 1987، دفع الجفاف والزراعة والرعي المفرط بالمنطقة نحو التصحر. وفي عام 1993، أنشأت تونس حديقة سيدي طوي الوطنية وأقامت حولها الأسوار. وبحلول عام 1999، انتعشت الأراضي العشبية الأصلية (صورة الشتاء). وظاهرة تصحر الأراضي الصالحة للزراعة ليست بالضرورة عملية وحيدة الاتجاه.

وقد أدخل الإنسان أيضاً مركّبات كيميائية غير طبيعية في الغلاف الجوي. وقد تبين في أوائل الثمانينيات أن طبقة الأوزون في الغلاف الجوي، التي تحمي من أشعة الشمس فوق البنفسجية، أخذت في الانكماش. وعلى وجه الخصوص، ظهر "ثقب" في طبقة الأوزون فوق القطب الجنوبي ما فتى يزداد اتساعاً عاماً بعد عام. وقد لوحظت هذه الظاهرة لأول مرة في البيانات الساتلية وتأكّدت لاحقاً برصدات أرضية. وأمكن تتبع السبب إلى التدمير الحفاز للأوزون بفعل الهالوجينات الذرية. وكان المصدر الرئيسي لهذه الهالوجينات هو التفكك الضوئي لمبردات الهالوكربون والمذيبات والدافعات الذاتية وعوامل نفخ الرغوة التي هي من صنع الإنسان.

الشكل 12

توزع الأوزون فوق القطب الجنوبي



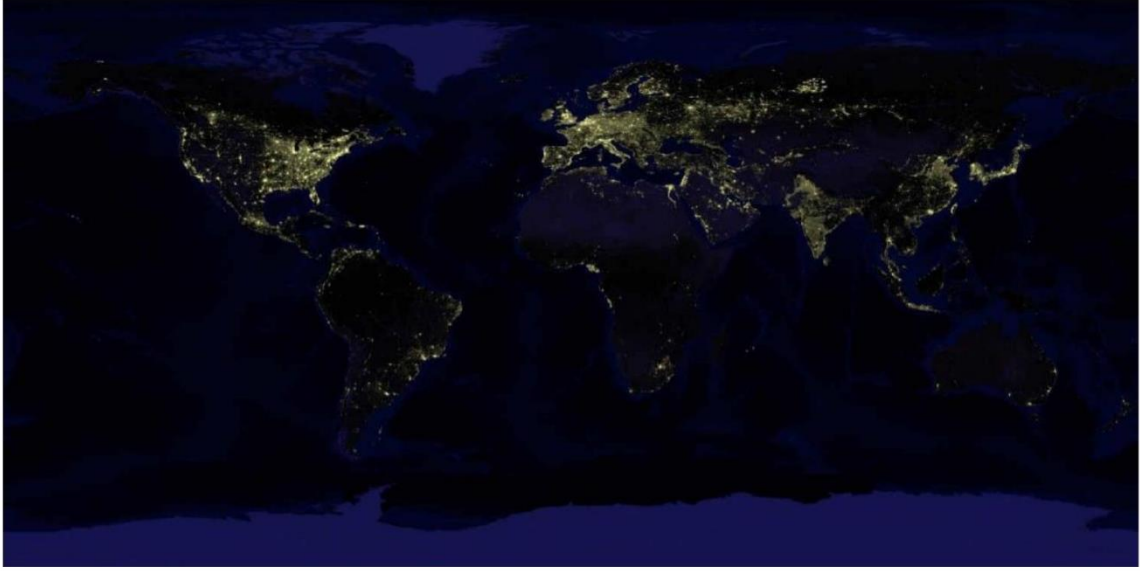
RS.1883-12

وفي مؤتمر المفوضين المعني بالبروتوكول المتعلق بمركبات الكلوروفلوروكربون الملحق باتفاقية فيينا لحماية طبقة الأوزون (مونترال، 1987) تم التوقيع على بروتوكول للحد من إنتاج واستخدام هذه المواد الكيميائية. وكانت النتيجة تراجع بطيء في استنفاد الأوزون. وطالما رصدت الأجهزة الساتلية حالة الغلاف الجوي هذه (الشكل 12) وبينت أثر التدابير المعتمدة في مونترال والبروتوكولين اللاحقين (لندن، 1990 وكوبنهاغن، 1992).

ويؤثر توزيع السكان أيضاً على المناخ، حيث يعيش الآن أكثر من نصف سكان الأرض في المناطق الحضرية. وجاءت أول إشارة لتوزيع السكان من خلال عمليات الرصد الليلي للأضواء المرئية المنبعثة من المناطق المأهولة بالسكان (انظر الشكل 13).

الشكل 13

رصد ليلي للأنوار المنبعثة من المناطق المأهولة بالسكان



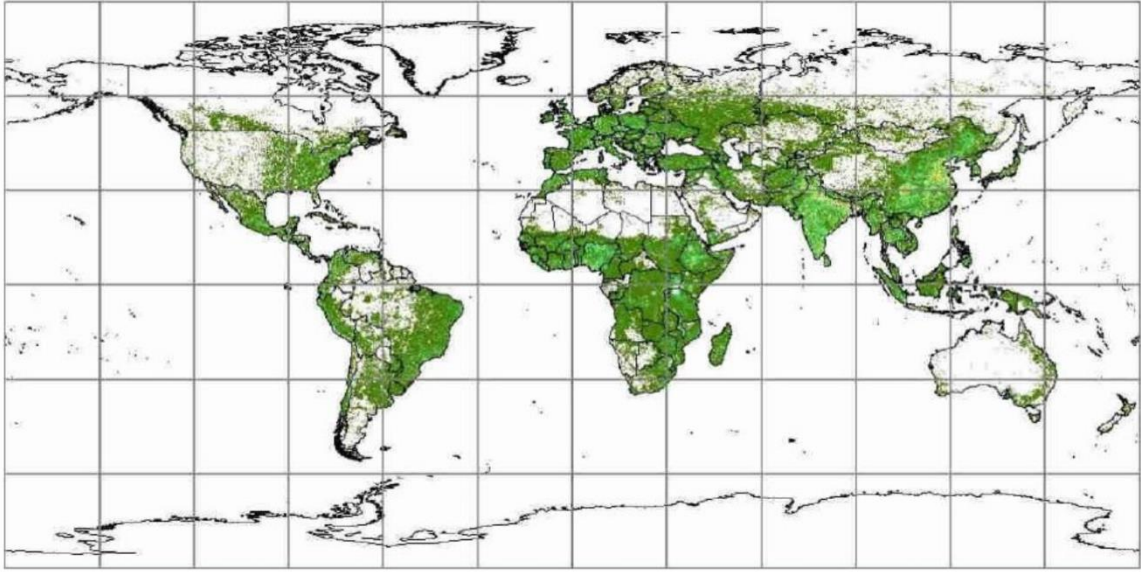
RS.1883-13

(DMSP data)

ومع ذلك، تبين أن هذه الرصدات تنتقص من تقدير عدد سكان البلدان النامية التي تفتقر إلى أضواء الشوارع وغيرها من الإضاءة الليلية التي تميز البلدان المتقدمة. وقد تم تطوير نموذج سكاني لاحقاً أضاف عنصر القرب من الطرق والمنحدرات والغطاء الأرضي وغيرها من المعلومات إلى عمليات رصد الإضاءة الليلية. واستقيت بيانات المنحدرات والغطاء الأرضي والإضاءة الليلية من البيانات الساتلية. ويرد هذا النموذج اللاحق في الشكل 14 أدناه وهو يمثل على نحو أفضل سكان البلدان النامية.

الشكل 14

توزع السكان على مستوى العالم



RS.1883-14

وسكان المناطق الحضرية الواقعة على طول السواحل هم أكثر عرضة لارتفاع مستوى سطح البحر. ويحتاج سكان الحضر أيضاً إلى تركيز المزيد من الموارد، مثل المياه والغذاء، الأمر الذي يزيد من إجهاد البيئة المحلية. وتؤثر بقع الحرارة المرتبطة بالمدن الكبرى على المناخ المحلي والإقليمي ولا بد من أن تؤثر أيضاً على المناخ العالمي في الأجل الطويل.

6 الخلاصة

وفرت أجهزة الاستشعار المحمولة على متن السواتل البيانات الأساسية في فهمنا للكوكب ولآثار تغير المناخ. ولما كانت هذه الأجهزة تواصل توفير البيانات الأساسية، فلا بد من مواصلة حمايتها في المستقبل.

الملحق 2

حالة رصد المتغيرات المناخية الرئيسية والعوامل المؤثرة

يسرد الجدول 1-A2 القياسات اللازمة، المفصلة في الجدول 2-A2، مقابل التقنيات المستخدمة للحصول عليها. وقد اقتبست القياسات اللازمة من تقرير مجلس البحوث الوطني في الولايات المتحدة بعنوان: علوم الأرض والتطبيقات من الفضاء، دار نشر الأكاديميات الوطنية، واشنطن العاصمة، 2007 (الجدول 1.A.9، الصفحات 298-303). وهذه الوثيقة متاحة في الموقع <http://www.nap.edu/catalog/11820.html>.

ويسرد الجدول 2-A2، بحسب التكنولوجيا المستخدمة، البنود المرصودة والبعثات المتاحة لتوفير تلك القياسات، سواء حوالي عام 2016 (عندما كتب هذا الملحق) وفي المستقبل. ويعمل هذا الجدول 2-A2 على تحديث المعلومات الواردة في تقرير مجلس البحوث الوطني في الولايات المتحدة المذكور أعلاه.

التقنيات المستخدمة للحصول على القياسات المتعلقة بالمناخ

[illegible]

الجدول 2-A2

حالة تغير المناخ ودعم التقلب

المتابعة (2025-2018)	الحالة (حوالي 2018)	القياس	الغرض	التقنية
BRLK on METEOR-MP (2021); S-SAR on NovaSAR-S (2018); SAR-L on SAOCOM-1,2 (2018); SAR-P on BIOMASS (2020); SAR-X on METEOR-MP (2021); SARs on PAZ (2018), CSG (2018, +), RADARSAT constellation (2018, +), RISAT-1A (2019), TSX-NG (2018)	SARs on RADARSATs (1995, +), TSX (2007), TDX (2010), COSMO-SkyMeds (2007, +), C-SAR on Sentinel-1 series (2014,+); HJ-1C (2012); COSI on KOMPSAT-5 (2013); PALSAR-2 on ALOS-2 (2014); RISAT-SAR on RISAT-1 (2012); SAR-C on RISAT-2 (2009); S-M OBRC on METEOR-M2 (2014); SAR-10 on Kondor-E1 (2013); X-SAR on TECSAR (2008)	بالتوافق مع المقاييس الراديوية بالموجات الصغيرة ينتج توليفة من المساحة والخشونة، وتوفر الطبوغرافيا مكافئ مياه الثلج	الصقيع الدائم، الأرض المتجمدة موسميًا، الغطاء الثلجي (ومكافئ مياه الثلج)	التصوير بالرادار ذي الفتحة التركيبية (SAR)
		مساحة البحيرات	مستويات البحيرات	
		مساحات البحيرات، الأنهار	تصريف الأنهار	
		الغطاء الأرضي بالارتداد الراداري	الغطاء الأرضي	
		مساحة المناطق الساحلية	مستوى سطح البحر	
RADARSAT Constellation (2019); InSAR on NISAR (2021)	SARs on RADARSATs (1995, +), TSX (2007), TDX (2010), COSMO-SkyMeds (2007, +), C-SAR on Sentinel-1 series - 1B (2014,+); SIRAL on CRYOSAT-2 (2010); SRAL on Sentinel-3 series (2016,+)	مساحة الجليد والتدفق، سمك الجليد البحري من الطبوغرافيا	الأنهار الجليدية والجليد البحري وأغطية الجليد	
OSCAT on OceanSat-3 (2018) and SCA on METOP-SG-B (2020); SCAT and SWIM on CFOSAT (2018); SCAT on METEOR-MP, -M (2018); WindRAD on FY-3 (2018)	ASCAT on MetOps (2006, +); SCAT on HY-2A (2011); OSCAT on OceanSat-2 (2009); DDMI on CYGNSS (2016); OSCAR on ScaSat-1 (2016)	متجه الرياح السطحية	حالة البحر، الرياح السطحية	قياس التبعثر بالرادار
	KU-RFSCAT on HY-2A (2011); MWRI on HY-2A (2011);	ملوحة سطح البحر، خشونة المحيط	ملوحة البحر	
SCA on METOP-SG-A (2022)		نمط ومدى الجليد البحري	الجليد البحري	
	DPR on GPM (2014)	رادار التهطل: الجانبية الرأسية لمعدل المطر	التهطل	رادار التهطل
	CloudSat (2006)	رادار السحاب: معدل رذاذ خفيف		
	CloudSat (2006)	رادار السحاب: حدود السحاب، التوزيع الرأسي للماء السائل، معدلات الرذاذ	خصائص السحاب (الموقع، حجم القطرة، خصائص بلورات سحاب الجليد)	رادار السحاب

الجدول 2-A2 (تابع)

المتابعة (2018-2025)	الحالة (حوالي 2018)	القياس	الغرض	التقنية
KaRIN on SWOT (2020); SRAL on JASON-CS/SENTINEL-6 (2018+); SHIOSAI on COMPIRA (2019)	SSALT on JASON series (2001, +); Altika-AMU on SARAL (2013); RA on HY-2A / (2011); SRAL on Sentinel-3 series (2016,+); JASON-3 (2016)	ارتفاع مستوى سطح البحر - المحيط	مستوى سطح البحر	قياس الارتفاع بالرادار
SRAL on JASON-CS/SENTINEL-6(2018,+); KaRIN on SWOT (2020)	POSEIDON on JASON Series (2001, +); RA on HY-2A (2011); SRAL on Sentinel-3 series (2016,+)	ارتفاع سطح المحيط الذي تأتي منه التيارات	سطح المحيط، التيارات دون السطح	
COSMIC-2/FORMOSAT-7 (2018); FY-3D.-3F(2016-2020); JASON-CS/SENTINEL-6 (2021); GRACE-FO (2018); METEOR-M-N3, METEOR-MP-N1,-N3 (2018); METOP-SG-A,-B (2022)	CHAMP (2000), COSMIC/FORMOSAT-2 (2006); KOMPSAT-5 (2013); FY-3 -C (2013); MetOp (2006, 2012); TDX (2010); TSX (2007); Megha-Tropiques (2011); OceanSat-2 (2009); DDMI on CYGNSS (2016)	جانبيات درجة حرارة الغلاف الجوي مع ما يصل إلى حوالي 0.5 كم استبانة رأسية بالقرب من السطح	درجة الحرارة: الجانبيات الرأسية	الحجب الراديوي للنظام العالمي لتحديد الموقع (GPS)
		جانبيات بخار الماء مع ما يصل إلى حوالي 0.5 كم استبانة رأسية بالقرب من السطح	بخار الماء: كميات الأعمدة، الجانبيات الرأسية	
ATLID on EarthCare (2019)	CALIPSO (2006)	الجانبيات الرأسية لتركيز الهباء، والحجم والشكل	الهباء التروبوسفيري: الموقع والخصائص	كشف وتحديد المدى (LIDAR)
		الجانبيات الرأسية لتركيز الهباء، والحجم والشكل	الهباء الستراتوسفيري: الموقع والخصائص	
		الحد العلوي للسحب الرقيقة بصريا مع الاستقطاب، طور الجسيمات	خصائص السحاب (الموقع، حجم القطرة، خصائص بلورات سحاب الجليد)	
	GLAS on ICESat (2003)	ارتفاع الجليد	الأنهار الجليدية والجليد البحري وأغطية الجليد	
		ارتفاع سطح الماء	مستويات البحيرات	
	ICESat (2002)	مقياس الارتفاع Lidar: مستويات الأنهار	تصريف الأنهار	

الجدول 2-A2 (تابع)

المتابعة (2018-2025)	الحالة (حوالي 2018)	القياس	الغرض	التقنية
SSM/IS on DMSP (2020); MWI on METOP-SG-A (2022); MWR on Sentinel-3B (end 2017)	GMI on GPM (2014); SSM/I on DMSP series (1987, +), SSMIS on DMSP series (2003, +); MWRI on FY-3 series (2008, +); MWR on Sentinel-3 series (2016,+)	معدل هطول المطر ومياه السحب السائلة	خصائص التهطل والسحب	أجهزة تصوير بالموجات الصغيرة المنفعلة
	SSM/I on DMSP series (1987, +), SSMIS on DMSP series (2003, +); AMSR-2 on GCOM-W1 (2012); MWRI on HY-2A (2011)	مدى الأنهار الجليدية والجليد البحري	الأنهار الجليدية والجليد البحري وأغطية الجليد	
	SSM/I on DMSP (1995, +); AMSR-2 on GCOM-W1 (2012)	مكافئ مياه الثلج	كتلة الثلج	
	MIRAS on SMOS (2009); Radiometer on SMAP (2015); SSM/I on DMSP series (1987, +), SSMIS on DMSP series (2003, +); MWRI on FY-3 series (2008, +); VIIRS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018)	رطوبة التربة باستثناء المناطق المغطاة بالجليد والثلوج والمناطق الحرجية الكثيفة	مياه جوفية	
	SMAP radiometer on SMAP (2015), MIRAS on SMOS (2009);	ملوحة سطوح البحار	ملوحة البحار	
	SSM/I on DMSP series (1987, +), SSMIS on DMSP series (2003, +); Windsat on Coriolus (2003), AMSR-2 on GCOM-W1 (2012); MTVZA-GY on Meteor-M series (2009, +) MWRI on HY-2A (2011)	سرعة الرياح السطحية	حالة البحار، الرياح السطحية	

الجدول 2-A2 (تابع)

المتابعة (2018-2025)	الحالة (حوالي 2018)	القياس	الغرض	التقنية
MWS, MWI on METOP-SG-A (2022); MTVZA-GY-MP on METEOR-MP (2021)	MSU since 1979 currently on NOAA series (2002, +); SSM/I on DMSP (1995, +); AMSU on Aqua (2002), MetOp (2006, +); DFMRM on FAST-T; MTVZA-GY on Meteor-M Series (2009, +); MWTS on FY-3 series (2003, +) CrIS, ATMS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018)	جانبية حرارة الغلاف الجوي	درجة الحرارة: الجانبيات الرأسية	أجهزة سبر بالموجات الصغيرة المنفعلة
AMR on SWOT (2020); AMR-C on JASON-CS/SENTINEL-6 (2018); MTVZA-GP-MP on METEOR-MP (2021); MWI and MWS on METOP-SG-A (2022)	SSM/I on DMSP series (1995, +); ATMS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018); Altika-RMU on SARAL (2013); AMSU on AQUA(2002), NOAA series (1998, +); AMSU-A on MetOp series (2006 +); SSM/T on DMSP series (1999, +); SAPHIR on Megha-Tropiques (2011); MTVZA-GY on METEOR-M-1 (2009), - M2 (2014); MWRI on FY-3 series (2008 +) and HY-2A (2011); MWR on Sentinel-3 series (2016, +); AMR-2 on JASON-3 (2016)	جانبيات بخار الماء في الغلاف الجوي والكميات الإجمالية	خصائص مياه الغلاف الجوي	
	TES, MLS on Aura (2004); MWR on Sentinel-3 series (2016,+)	أجهزة قياس راديوية لمسح الأطراف بالموجات الصغيرة والأشعة تحت الحمراء: كميات طبقة بخار الماء في التروبوسفير العلوي، الستراتوسفير	بخار الماء: كميات الأعمدة، الجانبيات الرأسية	
	MLS on Aura (2004)	سبر الأطراف بالموجات الصغيرة يوفر جانبية رأسية للأوزون في الستراتوسفير	الغازات النزرة المتحكممة في الأوزون (HCl, N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, HNO ₃)	
	AVHRR on NOAA series (2000, +); AIRS, MODIS on Aqua (2002); MODIS on Terra (1999); VIIRS, CrIS, ATMS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018); GMI on GPM (2014); AMSR-2 on GCOM-W1 (2012); MWRI on HY-2A (2011); MIRAS on SMOS (2009); WindSat on Coriolus (2003)	مسابير بالموجات الصغيرة والأشعة تحت الحمراء: درجة حرارة سطح البحار	سطح المحيط، درجة الحرارة دون السطح	

الجدول 2-A2 (تابع)

المتابعة (2018-2025)	الحالة (حوالي 2018)	القياس	الغرض	التقنية
	MODIS, CERES on Terra (1999), Aqua (2002); VIIRS, CERES on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018)	بالتوافق مع المقاييس الراديوية بالنطاق العريض يتوفر تحديد المشهد، قمة تدفقات الغلاف الجوي	ميزانية إشعاع الأرض ميزانية إشعاع السطح	التصوير البصري متعدد الأطياف
TROPOMI on Sentinel-5P (2017); UVNS (Sentinel-5) on Metop-SG-A (2020); UVNS (Sentinel-4) on MTG (2020)	AVHRR since 1981, currently on NOAA series (2002, +); MODIS, MISR on Terra (1999); MODIS on Aqua (2002); VIIRS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018)	توفير عمق بصري، بعض الاستدلال عن الحجم فوق المحيطات والأسطح الدائنة خصائص طبقة سحابة واحدة فعالة. AVHRR - حجم المياه الجوية MODIS، VIIRS و VIIRS - استدلال طور المياه الجوية	الهباء التروبوسفيري: الموقع والخصائص خصائص السحاب (الموقع، حجم القطرة، خصائص بلورات سحاب الجليد)	
	MODIS on Terra (2000), Aqua (2002)	كميات الأعمدة من قنوات بخار الماء بالأشعة قرب تحت الحمراء	كميات أعمدة بخار الماء، جانبيات رأسية	
	AVHRR on NOAA series (2002, +): inferences of atmospherically corrected spectral albedos; MODIS on Terra (2000), Aqua (2002); Landsat since 1973, -7, -8 (1999, 2013); VIIRS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018); MSI on Sentinel-2A/B (2015/2017)	مؤشر الغطاء النباتي، استدلال البياض السطحي	غطاء سطح الأرض والبياض السطحي (غطاء الثلج والأنهار الجليدية وأغطية الجليد في أماكن أخرى)	
	Hyperion on EO-1 (2000)	الصور الفائقة الطيفية: أنواع النباتات، الغطاء الأرضي	غطاء سطح الأرض والبياض السطحي (وليس غطاء الثلج والأنهار الجليدية وأغطية الجليد)	
	Landsat since 1973, -7, -8 (1999, 2013)	صور استبانة عالية: مناطق البحيرات والأنهار	مستويات البحيرات والأنهار	
FLORIS on Flex (2023)	AVHRR data since 1979, on NOAA series (2002, +); MODIS on Terra (2000), Aqua (2002); MISR on TERRA (1999); SeaWiFS (1997); VIIRS on SNPP (2012) and NOAA-20 (2018); MSI on Sentinel-2A/B (2015/2017)	مؤشر الغطاء النباتي	الكتلة الحيوية الأرضية، جزء من الإشعاع الضوئي النشط؛ مؤشر مساحة الأوراق	
FLORIS on Flex (2023)	Landsat since 1973, -7, -8 (1999, 2013); ASTER on Terra (2000); Hyperion on EO-1; SPOT series (1994, +)	مؤشر الغطاء النباتي في استبانة مكانية أعلى	مؤشر مساحة الأوراق	

الجدول 2-A2 (تابع)

التقنية	الغرض	القياس	الحالة (حوالي 2018)	المتابعة (2018-2025)
	الأنهار الجليدية والجليد البحري وأغطية الجليد	تغطية المنطقة	AVHRR since 1979, on NOAA series (2002, +); MODIS on Terra (2000), Aqua (2002); Landsat since 1973, -7, -8 (1999, 2013); VIIRS on SNPP(2011) and NOAA-20 (2018)	
	سطح المحيطات، درجة الحرارة دون السطح	درجة الحرارة دون سطح البحر	AVHRR, data since 1981, on NOAA series (2000, +); MODIS on Terra (2000), Aqua (2002); VIIRS on SNPP(2011) and NOAA-20 (2018)	
تصوير بصري (أشعة فوق البنفسجية - تحت الحمراء)	الأوزون في الستراتوسفير، التروبوسفير	التصوير الراديوي بالأشعة فوق البنفسجية يوفر جانبيات أعمدة الأوزون التروبوسفيري، وجانبيات الاستبانة الرأسية الخشنة للأوزون في الستراتوسفير	OMI on Aura (2004); OMPS on SNPP (2011) and NOAA-20(2018)	UVNS (Sentinel-5) /on Metop-SG-A (2020); UVNS (Sentinel-4) on MTG (2020)
	الاضطراب الناجم عن الحرائق	توفر الصور الحرارية بالأشعة قرب تحت الحمراء كشفاً مكانياً عالي الاستبانة لبقع الحرائق	AVHRR data from 1981, on NOAA series (2002, +); MODIS on Terra (2000), Aqua (2002); VIIRS on SNPP (2012) and NOAA-20 (2018)	UVNS (Sentinel-5) on Metop-SG-A (2020); UVNS (Sentinel-4) on MTG (2020)
	مجموع الإشعاع الشمسي	قياس مباشر	SORCE (2003); TIM on Glory (2008)	
	الهباء التروبوسفيري: الموقع والخصائص	أجهزة التصوير الراديوي بالأشعة فوق البنفسجية: العمق البصري، بعض الاستدلال على الامتصاص لطبقات الهباء المرتفعة	OMI on Aura (2004); OMPS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018)	
		مقاييس الاستقطاب: العمق البصري، الحجم، الشكل، البياض وحيد الانتثار		
	خصائص السحاب (الموقع، حجم القطرة، خصائص بلورات السحاب الجليدي)	مسابير، مصورات 15 μm : ضغط الطبقة السحابية لنظام سحابي أحادي الطبقة فعال، حتى بالنسبة لسحاب رقيق بصرياً	HIRS on NOAA series (2002, +); MODIS on Terra (1999), Aqua (2002); AIRS on Aqua (2002); CrIS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018)	
		أجهزة قياس راديوية متعددة الرؤية، أجهزة قياس الاستقطاب	MISR on Terra (1999); cloud altitude from stereo imaging	

الجدول 2-A2 (تتمة)

التقنية	الغرض	القياس	الحالة (حوالي 2018)	المتابعة (2018-2025)	
مسابير أشعة تحت الحمراء	الغازات النزرة المتحركة في الأوزون (HCl, N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, HNO ₃)	توفير الجانبيات الرأسية للأوزون في الستراتوسفير	AIRS on Aqua (2002)		
	CO ₂ , CH ₄	مسابير تحت الحمراء	AIRS on Aqua (2002); CO ₂ only with OCO-2 (2014)		
	CH ₄	مطياف الأشعة تحت الحمراء: تركيزات CH ₄ في أعمدة عالية الدقة	TES on Aura (2004); AIRS on AQUA (2002)		
	بخار الماء: كميات الأعمدة، الجانبيات الرأسية	كميات طبقة بخار الماء في استبانة رأسية خشنة نسبياً في التروبوسفير	HIRS data since 1979, on NOAA series (2002, +); CrIS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018)		
			AIRS on Aqua (2002); TES on Aura (2004); CrIS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018)		
قياسات الأطراف	الهباء الستراتوسفيري: الموقع والخصائص	قياسات الأطراف والحجب الشمسي: جانبية تبديد الهباء	infrared radiometer; SAGE II on ERBS (1984-2006); SAGE III on Meteor (2002-2006) SciSat (Canadian-U.S.)		
		ضوء مبعثر الأطراف: جانبية العمق البصري للهباء	OMPS on SNPP (2011) and NOAA-20 (2018)		
القياسات القائمة على الجاذبية	الأنهار الجليدية والجليد البحري وأغطية الجليد	كتلة الجليد عندما بقتن بقياس الطبوغرافيا	GRACE-FO (2018)		
	المياه الجوفية	المياه الجوفية واسعة النطاق (تتطلب عمليات رصد مساعدة في الموقع)			
	أسطح المحيطات، التيارات دون السطحية	تحولات الكتل السطحية أو الباروتروبية (محسوبة بالاقتران مع قياسات الارتفاع السطحي)			