



## Observation and integrated Earth-system science: A roadmap for 2016—2025

Adrian Simmons, Jean-Louis Fellous, Venkatachalam Ramaswamy, Kevin Trenberth, and fellow contributors from a Study Team of the Committee on Space Research: Ghassem Asrar (Univ. of Maryland), Magdalena Balmaseda (ECMWF), John P. Burrows (Univ. of Bremen), Philippe Ciais (IPSL/LSCE), Mark Drinkwater (ESA/ESTEC), Pierre Friedlingstein (Univ. of Exeter), Nadine Gobron (EC/JRC), Eric Guilyardi (IPSL/LOCEAN), David Halpern (NASA/JPL), Martin Heimann (MPI for Biogeochemistry), Johnny Johannessen (NERSC), Pieternel F. Levelt (KNMI and Univ. of Technology Delft), Ernesto Lopez-Baeza (Univ. of Valencia), Joyce Penner (Univ. of Michigan), Robert Scholes (Univ. of the Witwatersrand), Ted Shepherd (Univ. of Reading)

## Abstract

This report is the response to a request by the Committee on Space Research of the International Council for Science to prepare a roadmap on observation and integrated Earth-system science for the coming ten years. Its focus is on the combined use of observations and modelling to address the functioning, predictability and projected evolution of interacting components of the Earth system on time-scales out to a century or so. It discusses how observations support integrated Earth-system science and its applications, and identifies planned enhancements to the contributing observing systems and other requirements for observations and their processing. All types of observation are considered, but emphasis is placed on those made from space.

The origins and development of the integrated view of the Earth system are outlined, noting the interactions between the main components that lead to requirements for integrated science and modelling, and for the observations that guide and support them. What constitutes an Earth-system model is discussed. Summaries are given of key cycles within the Earth system.

The nature of Earth observation and the arrangements for international coordination essential for effective operation of global observing systems are introduced. Instances are given of present types of observation, what is already on the roadmap for 2016—2025 and some of the issues to be faced. Observations that are organised on a systematic basis and observations that are made for process understanding and model development, or other research or demonstration purposes, are covered. Specific accounts are given for many of the variables of the Earth system.

The current status and prospects for Earth-system modelling are summarized. The evolution towards applying Earth-system models for environmental monitoring and prediction as well as for climate simulation and projection is outlined. General aspects of the improvement of models, whether through refining the representations of processes that are already incorporated or through adding new processes or components, are discussed. Some important elements of Earth-system models are considered more fully.

Data assimilation is discussed not only because it uses observations and models to generate datasets for monitoring the Earth system and for initiating and evaluating predictions, in particular through reanalysis, but also because of the feedback it provides on the quality of both the observations

and the models employed. Inverse methods for surface-flux or model-parameter estimation are also covered. Reviews are given of the way observations and the processed datasets based on them are used for evaluating models, and of the combined use of observations and models for monitoring and interpreting the behaviour of the Earth system and for predicting and projecting its future.

A set of concluding discussions covers general developmental needs, requirements for continuity of space-based observing systems, further long-term requirements for observations and other data, technological advances and data challenges, and the importance of enhanced international co-operation.

### **Спостереження та інтегровані дослідження системи Земля: дорожня карта на період 2016—2025 роки**

В документі розглянуто стан та перспективи спостережень і обробки, а також асиміляції даних і моделей в галузі інтегрованих досліджень земної системи. Під виразом «земна система» автори розуміють систему, яка включає земну атмосферу, океани, сушу та льодову поверхню планети Земля. Головними об'єктами вивчення є природна та антропогенна змінність цих компонентів земної системи. Огляд є відгуком великої групи вчених різних країн на запит COSPAR щодо підготовки дорожньої карти для спостережень та досліджень інтегрованої земної системи на наступні десять років. Пропозиції сфокусовані на комбінованому використанні спостережень та моделювання для визначення функціонування, прогнозованості та передбачення еволюції взаємодіючих компонентів земної системи на часових інтервалах від десятиріч до сторіччя.

Підкреслено важливість кліматичних та інших змін навколишнього середовища, природних змін та антропогенної дії. Досі є багато невирішених проблем для достовірного моделювання природного стану земної системи. В огляді обговорюється як спостереження забезпечують дослідження земної системи і відзначено заплановане підсилення внеску спостережних систем та інші вимоги до спостережень та їхньої обробки.

Розглянуто складові моделі земної системи та її ключові цикли. Розглянута природа спостережень Землі та підготовка до міжнародної координації, яка є важливою для ефективного функціонування глобальних спостережних систем. Коротко описано типи спостережень,

які вже існують в системі дорожньої карти на 2016—2025 роки, і нові типи спостережень. Підкреслено еволюцію в напрямку використання моделей земної системи для моніторингу навколишнього середовища та прогнозу, а також для кліматичного моделювання. Обговорено головні аспекти покращення моделей завдяки уточненню процесів, які вже включені в модель, а також додавання нових процесів.

Головними напрямками на 2016—2025 рр. є інтегроване моделювання земної системи, а саме енергетики, циркуляції та головних природних циклів (наприклад цикл вуглецю) всередині системи. Має відбуватись вдосконалення спостережень Землі, розвиватись міжнародна координація спостережень Землі, створюватись постійна супутникова спостережна система для погоди та клімату, наприклад програма «Copernicus» — космічні вартові (супутники серії «Sentinels»).

Підкреслюється, що асиміляція даних має використовуватись не тільки з метою створення баз даних і моделей для моніторингу земної системи, але і для ініціалізації та оцінки прогнозів, зокрема завдяки реаналізу, а також для визначення зворотних зв'язків для покращення якості спостережень і моделей. Зроблено огляд методів спостережень і готових рядів даних, що базуються на цих спостереженнях, які використовуються для оцінки моделей і комбіноване використання спостережень і моделей для моніторингу і інтерпретації поведінки земної системи і для передбачення її майбутнього.

Для успіху моделювання та асиміляції даних про земну систему необхідні спостереження принципів складових цієї системи (озон, аерозолі, парникові гази) та створення сталої системи довгострокових спостережень з космосу. Підкреслено важливість продовження та розвитку наземних спостережень для валідації космічних даних, нових можливостей для спостережень завдяки розвитку технологій: мікросупутників, дронів для спостережень in situ, смартфонів (iSPEX), розвитку менеджменту даних (Big Data).

*Опубліковано в  
Advances in Space Research 57 (2016) 2037—2103  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117716300333>*

*Матеріал підготував  
доктор фізико-математичних наук,  
професор Г. П. МІЛІНЕВСЬКИЙ*