

ГЛАВА 1. ВВЕДЕНИЕ

1.1 ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Эра спутниковой метеорологии началась с запуска в конце 1950-х гг. серии спутников Спутник, которые обеспечили первые космические измерения взаимодействующей системы атмосфера-Земля (Menzel, 2001). Соединенные Штаты Америки начали свою метеорологическую космическую программу с запуска 1 апреля 1960 г. спутника для наблюдений в видимом и инфракрасном диапазонах спектра — 1 (ТАЙРОС-1). До появления ТАЙРОС-1 в рамках эксперимента на спутнике Эксплорер VII проводились измерения радиационного баланса, то есть баланса между поступающей солнечной радиацией и радиацией, выходящей из атмосферы в результате отражения солнечной радиации и тепловой эмиссии (Smith, 1985).

Первый геостационарный метеорологический спутник, Спутник прикладного назначения — 1 (АТС-1), был запущен 6 декабря 1966 г. и обеспечивал возможности наблюдения только в дневное время. Метеорологические системы, которые до этого времени отображались только при помощи синоптических карт и самолётных наблюдений, теперь могли быть представлены визуально в одно мгновение. Их быстро эволюционирующий характер стал особенно очевиден после получения снимков с геостационарного спутника. Появился термин «наукастинг», что стало первым результатом применения метеорологических спутников.

Первоначальное использование спутниковых данных сводилось почти исключительно к прогнозированию текущей погоды, главным образом в форме изображений. Другой важной областью применений было выведение параметров движения атмосферного воздуха (Fujita, 1968). Благодаря своей способности обеспечивать непрерывные измерения геостационарные спутники также стали незаменимы для мониторинга тропических циклонов и систем низкого давления средних широт (Purdom and Menzel, 1996).

Также постепенно сформировалось сообщество пользователей в области численного прогноза погоды (ЧПП). Излучения, измеряемые приборами серии ТАЙРОС для оперативного вертикального зондирования (ТОВС) на спутниках Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (НУОА), использовались для получения информации о температуре и влажности для зондирования (вертикальных профилей). На протяжении многих лет предпринимались попытки использовать эти данные зондирования температуры и влажности в ЧПП, подобно тому как использовалась информация с радиозондов. Зависимость ЧПП от радиозондов предполагала, что спутниковые данные должны были быть отформатированы по аналогии с характеристиками радиозондирования, в то время как спутниковые измерения излучения представляли собой совокупность данных по широкому пересечению слоев атмосферы и не сводятся к одноуровневым измерениям. Наконец, устойчивые преимущества спутниковых наблюдений излучения были реализованы благодаря сдвигу парадигмы, когда данные измерения излучения стали использоваться непосредственно в системе вариационной ассимиляции ЧПП вместо полученных данных зондирования (Eyre, 1997).

Таким образом, метеорологические спутники позволили совершенно по-новому взглянуть на метеорологическую и взаимодействующую систему атмосфера-Земля и на сегодняшний день предоставляют множество данных, которые являются неременным условием современного прогнозирования погоды во всех масштабах. Ярким примером является ЧПП: внедрение космических измерений существенно улучшило прогнозы ЧПП, и в настоящее время метеорологические спутниковые измерения лежат в основе ЧПП (WMO, 2012). Тот факт, что измерения посредством методов дистанционного зондирования являются жизненно важным компонентом системы наблюдений для целей глобального мониторинга и прогнозирования, отражается в растущем

числе международных партнерств, создаваемых для осуществления комплексных и скоординированных спутниковых программ, как описано в одной из последующих глав настоящего Руководства.

Высокая экономическая ценность исследований земных ресурсов и мониторинга вегетационного цикла продиктовала появление спутниковых программ, ставящих целью наблюдения за поверхностью суши. Эти спутники обладают высоким пространственным разрешением, но имеют низкую периодичность прохождения над тем или иным районом Земли. Landsat-1, запущенный 23 июля 1972 г., был первым из серии спутников, проводящих наблюдения за поверхностью суши с высоким разрешением, а 22 февраля 1986 г. с запуском спутника SPOT-1, обеспечивающего получение изображений с пространственным разрешением от 10 до 20 метров, начала функционирование серия спутников для наблюдений за Землей (SPOT).

Исследования Мирового океана при помощи спутников начались с запуска спутника SeaSat 27 июня 1978 г., что ознаменовало начало эры всепогодного микроволнового зондирования, как активного, так и пассивного. Примерно в это же время, 24 октября 1978 г., состоялся запуск Nimbus-7, который использовал пассивное микроволновое зондирование, сделав возможным проведение мониторинга цветности океана. После завершения спутниковых программ SeaSat с использованием альтиметрии, скаттерометрии и изображений РЛС с синтезированной апертурой приборы активного зондирования не эксплуатировались вплоть до запуска 17 июля 1991 г. Европейского спутника дистанционного зондирования Земли — 1 (ERS-1). Мониторинг уровня моря также стал одним из видов оперативной деятельности, например, благодаря серии спутников Jason. Краткая история вопроса была подготовлена Wilson et al. (2006).

Были продемонстрированы социально-экономические преимущества спутниковых данных, и в подробных оценках даже приводится анализ затрат и выгод, доказывающий огромную экономическую ценность спутниковых метеорологических наблюдений для общества и человечества. Примером может служить отчет Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников (EUMETSAT) об анализе затрат и выгод европейских полярно-орбитальных метеорологических спутников следующего поколения (серия Metop) (EUMETSAT, 2014).

1.2 **ВЗАИМОДОПОЛНЯЮЩИЙ ХАРАКТЕР СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Концепция Глобальной системы наблюдений с приходом спутников была полностью пересмотрена с учетом возможностей, возникающих вследствие взаимодополняющего характера наземных и космических наблюдений. Космические системы могут использоваться для наблюдений за взаимодействующей системой атмосфера-Земля во всей ее полноте. Полярно-орбитальные метеорологические спутники (на высоте около 800 км) обеспечивают глобальные наблюдения, однако частота наблюдений каждого района обычно не превышает двух раз в сутки. Низкоорбитальные высоты обеспечивают лучшее пространственное разрешение и позволяют использовать активные приборы (радиолокатор, лидар). Для более частотных наблюдений требуется флота полярно-орбитальных спутников. Геостационарный космический компонент (на высоте 36 000 км) предоставляет уникальную возможность непрерывного охвата, а также обеспечивает повторяющийся цикл наблюдений.

Впечатляющим преимуществом спутников является их способность выполнять плотные пространственные наблюдения над океанами, что позволяет устранить серьезное ограничение, присущее наблюдениям и не позволяющее использовать их для целей глобального ЧПП. Аналогичная аргументация применима и в отношении континентальных районов, где системы наблюдений в большей степени смещены в сторону населенных территорий, в то время как огромные участки суши имеют недостаточную плотность наблюдений.

Одно важное различие между измерениями дистанционного зондирования из космоса и наземными измерениями *in situ* связано с разной степенью интегрирования по пространству и времени. Космические измерения обеспечивают интегрирование входящего сигнала по мгновенному полю зрения. Наземные измерения *in situ* обычно привязаны к точке, несмотря на то что в зависимости от наблюдаемого параметра такие измерения могут быть репрезентативными для территории. Во временном отношении ситуация обратная. Космические измерения имеют почти мгновенный характер, тогда как наземные измерения *in situ* могут занимать определенное время (например, измерения с автоматической метеорологической станции) или могут интегрироваться по определенному временному интервалу, например, радиозонд проходит через атмосферу в течение продолжительного периода и обеспечивает единый профиль. Эти различия следует учитывать при сопоставлении спутниковых и наземных измерений.

Следует признать, что спутники не способны проводить все требуемые наблюдения, обеспечивая необходимое качество измерений. Для некоторых геофизических переменных методов дистанционного зондирования не существует. Для других требуемое качество измерений может быть обеспечено только при наличии дополнительной информации от высокоточных наземных систем наблюдений. Помимо этого, поскольку космические измерения носят непрямой характер (когда основной наблюдаемой количественной величиной является радиация), наземные измерения зачастую играют крайне важную роль в проверке спутниковой продукции. Краткая информация о текущих возможностях и роли наземных и космических систем приводится Saunders et al. (2015).

До сих пор существуют области, в которых только наземные системы способны осуществлять измерения приемлемого качества. Но и в этих случаях спутники могут быть полезны для пространственной экстраполяции локальных и немногочисленных наземных измерений. В частности, практика усвоения данных позволяет переносить информацию по всему набору геофизических переменных, измеренных при помощи различных методов: это означает, что спутниковые наблюдения вносят вклад в понимание геофизических переменных, даже когда геофизическая переменная не может быть получена напрямую со спутника; необходимым условием для этого является наличие физической зависимости между геофизической переменной и излучением, наблюдаемым со спутника. Совместное взаимовыгодное использование наземных и спутниковых наблюдений является основополагающим принципом Интегрированной глобальной системы наблюдений ВМО. В ЧПП это было достигнуто благодаря процессу ассимиляции данных.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- EUMETSAT. *The case for EPS/METOP Second-Generation: Cost Benefit Analysis*; 2014. https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_report_eps-sg_cost-benefit.pdf.
- Eyre, J. R. Variational Assimilation of Remotely-Sensed Observations of the Atmosphere. *Journal of the Meteorological Society of Japan* **1997**, 75 (1B), 331–338. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.75.1B_331.
- Fujita, T. T. Present Status of Cloud Velocity Computations from the ATS I and ATS III Satellites. In *Proceedings of Space Research IX: 11th COSPAR Plenary Meeting, Tokyo, Japan, 9–21 May 1968*; North-Holland Publishing Company: Amsterdam, 1969, pp 557–570.
- Menzel, W. P. *Applications with Meteorological Satellites* (SAT-No. 28; WMO/TD-No. 1078). World Meteorological Organization: Geneva, 2001.
- Menzel, W. P.; Phillips, J. M. Satellite Meteorology: How It All Started, 50 Years Ago. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2009**, 90 (10), 1435–1436. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2963.1>.
- Purdom, J. F. W.; Menzel, W. P. Evolution of Satellite Observations in the United States and Their Use in Meteorology. In *Historical Essays on Meteorology 1919–1995: The Diamond Anniversary History Volume of the American Meteorological Society*; Fleming, J. R., Ed.; American Meteorological Society: Boston, 1996; 99–155. https://doi.org/10.1007/978-1-940033-84-6_5.
- Smith, W. L. Satellites. In *Handbook of Applied Meteorology*; Houghton, D. D., Ed.; John Wiley and Sons: New York, 1985.
- Saunders, R.; Crewell, S.; Gelaro, R. et al. Observations for Global to Convective Scale Models. In *Seamless Prediction of the Earth System: From Minutes to Months* (WMO-No. 1156); WMO: Geneva, 2015.
- Wilson, W.S.; Fellous, J.-L.; Kawamura, H. et al. A History of Oceanography from Space. In *Remote Sensing of the Marine Environment*; Gower, J. F. R., Ed.; American Society for Photogrammetry and Remote Sensing: Bethesda, 2006.
- World Meteorological Organization (WMO). *Final Report of the Fifth WMO Workshop on the Impact of Various Observing Systems on Numerical Weather Prediction* (Окончательный отчет пятого семинара по влиянию различных систем наблюдений на численное прогнозирование погоды) (WIGOS Technical Report 2012-1). Geneva, 2012.

Примечание: подробное описание спутниковых программ и приборов можно найти в режиме онлайн в базе данных ВМО о возможностях для наблюдений из космоса, которая доступна по адресу: <https://www.wmo-sat.info/oscar/spacecapabilities>.
