

ГЛАВА 6. КАЛИБРОВКА И ВАЛИДАЦИЯ

6.1 КАЛИБРОВКА ПРИБОРА

6.1.1 Введение и обзор

Калибровкой называется процесс количественного определения отклика спутникового прибора на известный, управляемый входной сигнал (например, Ohring, 2007). Калибровочная информация содержится в калибровочной формуле или калибровочных коэффициентах, которые затем используются для преобразования выходного сигнала прибора (к примеру, «число интервалов дискретизации измеряемого сигнала») в физические единицы (например, значение интенсивности излучения $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$). Калибровка прибора очень важна для обработки количественных данных, особенно для получения продукции. Для комбинирования данных, полученных с помощью различных приборов, также необходима соответствующая калибровка, что позволяет обеспечить сопоставимость данных. Для климатических применений требование в отношении проведения тщательной калибровки является особенно жестким, поскольку выявление незначительных трендов за продолжительные периоды требует возможности сравнения различных приборов, установленных в разное время на разных спутниковых системах. Построение однородных рядов климатических данных зависит от стабильной калибровки и характеристик неопределенности.

Обычно следует рассматривать пять областей, в которых снимают характеристики: радиометрическая, калибровочная и спектральная, пространственная, временная и поляризационная характеристика. Исчерпывающий протокол калибровки должен включать оценки неопределенности в параметрах калибровки. Калибровка спутникового прибора должна учитывать этапы жизни прибора. На практике это означает, что необходимо учитывать соответствующие изменения (например, временные изменения характеристик датчика) (Ohring, 2007). В последних обзорных статьях, посвященных вопросам калибровки спутников, поясняются ключевые аспекты калибровки и взаимной калибровки спутников. В работе Zhou et al. (2015) довольно подробно рассматриваются вопросы калибровки солнечных каналов спутниковых приборов. Работа Chander et al. (2013) содержит объяснение того, почему необходимо проводить взаимную калибровку спутников, и знакомит читателя со всеми соответствующими аспектами и предостережениями, касающимися калибровки спутников. В этой статье также приводится всеобъемлющий список литературы по нижеописанным методам взаимной калибровки и косвенной калибровки спутников. Более подробная информация представлена в работах Doelling et al. (2004), Goldberg et al. (2011) и Meirink et al. (2013).

В давно сложившемся методе калибровки используются хорошо изученные стабильные цели на Земле; луна является резервным вариантом, когда спутниковый прибор нельзя напрямую сравнить с согласованным образцовым эталоном, например из-за отсутствия на борту надежного калибровочного устройства. Это типичный случай для большинства коротковолновых наблюдений с оперативных метеорологических спутников (например, Govaerts et al., 2004). Такие методы обычно называют «косвенной калибровкой», что означает, что они используются вместо непосредственной калибровки с помощью хорошо известного источника излучения.

Концепция взаимной калибровки спутников существует в спутниковом сообществе довольно давно. В принципе, калибровка представляет собой сравнение с другим прибором, который находится выше по иерархии, чем калибруемый прибор, и ближе к СИ или ближе к стандарту СИ в цепочке прослеживаемости. При сравнении приборов, занимающих одинаковое положение в этой иерархии, мы используем термин сравнение, или взаимное сравнение для проведения взаимной оценки между набором приборов. Такие (взаимные) сравнения устанавливают различия между приборами, а не погрешности конкретного прибора, как в случае калибровки. В метрологии взаимные различия и ошибки имеют разные значения (см. JCGM 200, 2012).

Поскольку при использовании космических систем наблюдения возникают особые трудности при калибровке, часто применяется взаимная калибровка (определение и объяснение которой дается в этой главе). Взаимная калибровка приборов с общим эталонным прибором позволяет достичь совместимости результатов космических измерений в заданной точке по времени. Калибровка по абсолютному стандарту необходима для оценки ошибок и однозначного обнаружения любого долгосрочного смещения во времени, что существенно важно для мониторинга климата (Wielicki et al., 2013). Однако калибровка по абсолютному стандарту и прямому эквиваленту в единицах СИ часто не представляется возможной, когда прибор находится в космосе, и требуется альтернативный метод.

В качестве одного из первых примеров можно привести Международный проект по спутниковой климатологии облаков (ИСККП), в рамках которого использовался прибор AVHRR на спутниках НУОА в качестве псевдоэталонного стандарта, поскольку тепловые ИК-каналы в окнах AVHRR имели встроенную функцию калибровки по абсолютно черному телу. Оценочная общая неопределенность в калибровке излучения AVHRR составляла 5 %-10 % для видимого диапазона и около 2 %-3 % для инфракрасного диапазона или 1,5-2,5 К при яркостной температуре 300 К (Rossow et al. 1996), а приборы на других спутниках сравнивались с AVHRR. Поскольку подобная система не является ни настоящей калибровкой, ни классическим взаимным сравнением, был введен термин взаимная калибровка.

Другим примером является первая попытка систематического сопоставления тепловых ИК-каналов геостационарных метеорологических спутников (Menzel et al., 1993), в ходе которой проводилось взаимное сравнение европейских спутников Meteosat и американских спутников ГОЕС. В рамках КГМС международное участие в этом процессе было расширено, и в результате была создана Глобальная космическая система взаимных калибровок (ГСИКС) (Goldberg et al., 2011).

Наконец, главные центры численных прогнозов погоды (ЧПП) могут также оказывать помощь в определении соответствующих систематических погрешностей сравниваемых приборов путем сопоставления в системах усвоения данных смоделированных и наблюдаемых спутниковых данных об интенсивности излучения. Вместе с тем, невозможно определить абсолютные смещения с излучениями, рассчитанными по полям моделей ЧПП, поскольку модели имеют свои собственные смещения.

На веб-сайте Интегрированной системы калибровки и валидации, посвященном долгосрочному мониторингу со спутников, объясняются способы использования всех этих инструментов (<https://www.star.nesdis.noaa.gov/icvs/>)

Ряды данных наблюдений, полученных в прошлом с помощью приборов предыдущих поколений, могут быть фактически вновь откалиброваны, если станет доступной дополнительная информация о состоянии этих приборов и будут разработаны новые способы проведения взаимной калибровки. В работе John et al. (2019) демонстрируется повторная калибровка геостационарных изображений с использованием калиброванных наблюдений за излучением с помощью HIRS (инфракрасного датчика с высокой разрешающей способностью) и гиперспектральных датчиков IASI (Интерферометр зондирования атмосферы в инфракрасном диапазоне) и AIRS (усовершенствованный прибор для зондирования в ИК-диапазоне). Сравнение повторных калибровок с оперативными калибровками продемонстрировало значительное снижение смещений. Такая работа важна, потому что благодаря ей исторические спутниковые наблюдения излучения становятся полезными для климатических видов применения.

Здесь также следует отметить принципы мониторинга климата Глобальной системы наблюдения за климатом (ГСНК), которые были разработаны с упором на предоставление подходящих данных для мониторинга климата. Эти принципы содержат краткий перечень требований, которым должны соответствовать спутниковые (и наземные) измерения: <https://gcos.wmo.int/site/global-climate-observing-system-gcos/essential-climate-variables/about-essential-climate-variables?book=22923>.

Полезную дополнительную информацию, касающуюся вопросов калибровки, можно получить на веб-сайте Рабочей группы КЕОС по калибровке и валидации: <http://calvalportal.ceos.org>.

6.1.2 Факторы, влияющие на калибровку

Чувствительность прибора к входному сигналу, например соотношение между интенсивностью излучения, которой подвергается прибор, и численным значением конкретного результата измерения (в физических единицах, например $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ или $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$), в каждый момент времени зависит от нескольких факторов, таких как:

- a) геометрия обзора, экранирующие эффекты, засветка и диаграмма направленности антенны;
- b) чувствительность и эксплуатационное изнашивание детектора;
- c) фильтрующая оптика, а также возможное загрязнение и его изменение со временем, а также стабильность фильтрующего материала;
- d) окружающая среда (температура, излучение, вибрация) для всех частей прибора, включая фронтальную оптику, зеркала в оптическом пути, детектор и электронику внутреннего интерфейса (электроника фокальной плоскости, предварительный усилитель и так далее);
- e) система обработки сигнала (коэффициент усиления, аналогово-цифровой преобразователь и так далее).

Эти факторы также влияют на функцию спектрального отклика и функцию рассеяния точки, которые определяют характеристики прибора. Они должны быть определены перед запуском и, при наличии возможности, отслеживаться во время работы на орбите. Для понимания состояния прибора и тенденций, а также для предварительной оценки и корректировки систематических погрешностей удобно использовать модели программного обеспечения прибора, имитирующие его работу и функциональные возможности. Тем не менее, как правило, невозможно описать аналитическими средствами точное изменение чувствительности прибора, являющееся следствием многочисленных факторов, способных оказывать влияние на калибровку. Таким образом, контрольные измерения (например, с помощью размещенного на борту абсолютно черного тела) являются обязательными при проведении точной калибровки.

6.1.3 Предпусковая калибровка

Предпусковая калибровка прибора проводится в лаборатории с использованием точно известных источников радиации в контролируемых условиях. До запуска на орбиту необходимо смоделировать ожидаемые состояния прибора и воздействующие на калибровку факторы, поскольку это единственный способ точно охарактеризовать и смоделировать поведение прибора перед тем, как он будет подвержен суровому воздействию космической среды в жестких условиях внешней среды орбитального полета. Необходимо обеспечить надежную работу систем проверки данных бортовых систем, которые обеспечивают информацию о спутнике и его состоянии, включая приборы, чтобы они были способны выдержать физический стресс на этапах запуска, и нахождения на орбите. Данные, полученные по результатам проверки бортовых систем, в сочетании с информацией о калибровке после запуска прибора позволят операторам судить о состоянии калибровки прибора и будут способствовать поиску решений в нештатных ситуациях, которые могут возникнуть в процессе работы на орбите. Подробное рассмотрение мероприятий по определению характеристик и калибровке перед запуском выходит за рамки настоящего Руководства ВМО. Однако заинтересованным читателям

предлагается обратиться к посвященной этому вопросу работе Datla et al. (2011), где дается исчерпывающее описание характеристики и калибровки пассивных оптических приборов дистанционного зондирования перед запуском.

6.1.4 Бортвая калибровка

Бортвая калибровка прибора на орбите обычно осуществляется с использованием эталонных целей (таких как абсолютно черное тело в инфракрасном диапазоне спектра, а также диффузоры солнечного света, виды Луны и ламповые линейные источники излучения в коротковолновом диапазоне спектра) для пассивных приборов или встроенных калибровочных систем (таких как мониторы усиления спектра) для активных приборов.

Некоторые унаследованные приборы работают без использования адекватных способов проведения бортовой калибровки в течение десятилетий, например солнечные каналы AVHRR. Для таких приборов необходимо использовать другие способы калибровки (например, косвенную калибровку или взаимное сравнение с другими приборами).

Точность калибровки прибора, работающего на орбите, зависит от стабильности бортовых калибровочных систем на протяжении всего времени эксплуатационного ресурса прибора. Поэтому калибровка обязательно должна подвергаться регулярной проверке путем проведения взаимных сравнений с более точным контрольным прибором. В случае каналов ИК-изображения это можно сделать с помощью приборов гиперспектрального зондирования, таких как AIRS, IASI и CrIS (инфракрасный зонд для сканирования поперек трассы) (например, Goldberg et al. 2011; Hewison et al. 2013). Для спутниковых приборов, измеряющих отраженное солнечное излучение, взаимное сравнение различных приборов в течение более длительных временных периодов позволяет оценить относительную эффективность работы; проведение коррекции смещений может позволить изучать тенденции (Zhan and Davies, 2016).

В случае с приборами для измерения инфракрасного излучения и когда допускается, что детекторы радиометров имеют линейную характеристику чувствительности, напряжение на выходе определяется формулой:

$$V = \alpha R + V_0$$

где R — входящая энергетическая яркость, α — чувствительность радиометра и V_0 — системная погрешность. Калибровка состоит из определения α и V_0 , которое осуществляется путем экспонирования радиометра минимум на две эталонные мишени с сильно различающимися температурами яркости. На практике линейная зависимость может не сохраняться, и при оперативной калибровке необходимо учитывать поправку на нелинейность (например, квадратичный член).

Для приборов для измерения инфракрасного и микроволнового излучения одной эталонной целью обычно является глубокое космическое пространство с температурой 2,7 К. Однако для приборов на спутниковой платформе не всегда имеется возможность направить прибор в сторону глубокого космоса. Например, приборы, всегда нацеленные в сторону поверхности Земли, необходимо оснастить вспомогательным зеркалом для обеспечения обзора глубокого космоса с определенной периодичностью. Второй целью обычно является хорошо изученный источник с температурой в средней части и до верхнего уровня динамического диапазона, чаще всего это размещенное на борту абсолютно черное тело, которое идеально сопоставимо с СИ, т. е. шкалой энергетической яркости, предоставляемой национальным метрологическим учреждением.

Для приборов для измерения ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра бортовая калибровка является более сложной задачей, поскольку она подвержена влиянию многих факторов. Для слабых сигналов глубокое космическое пространство является подходящим эталоном для контрольного измерения при условии, что возмущающие эффекты (например, отражения от других частей спутника) отсутствуют. При очень сильных сигналах абсолютный источник обычно заменяется

Солнцем, наблюдаемым через солнечные диффузоры, которые обеспечивают относительно стабильные характеристики для контрольного замера. Луна также может использоваться в качестве эталонной цели с тем преимуществом, что на нее можно смотреть без аттенюатора; однако она должна использоваться в сочетании с точной моделью двунаправленной отражательной способности Луны (Kieffer and Stone 2007). В настоящее время ни солнечные диффузоры, ни Луна не обеспечивают калибровки абсолютным методом. Другой часто используемой системой является стенд ламповых линейных источников на борту с хорошо контролируемой интенсивностью излучения. Также необходимо принимать во внимание воздействие спектрально-зависимой поляризации, вызванной влиянием отражающих поверхностей оптики прибора.

6.1.5 Косвенная калибровка

Проблемой при проведении бортовой калибровки является то, что во многих случаях структура измерительных средств не позволяет подвергнуть всю основную оптику облучению с помощью эталонных источников. Например, стабилизированный вращением радиометр на геостационарной орбите использует встроенное абсолютно черное тело, требующее моделирования с учетом вклада телескопа и периферийной оптики в фоновое излучение. Для приборов более старых поколений (таких как *Meteosat* первого поколения) эталонный источник абсолютно черного тела использовался скорее для мониторинга устойчивости функционирования, чем для калибровки абсолютным методом. В качестве обходного способа для тепловых ИК-каналов использовались косвенные калибровки с использованием модели быстрого радиационного переноса со вспомогательными входными данными, то есть атмосферными профилями от ЧПП и радиозондов (например, van de Berg et al., 1995). Более широкие вопросы, касающиеся этих ранних метеорологических спутников, кратко рассматриваются в работе Schmetz and Menzel (2015).

Для калибровки солнечных каналов были проведены специальные авиационные кампании с использованием хорошо откалиброванных радиометров и солнечных калибровок для спутников *Meteosat* первого поколения. Калибровки были получены путем сравнения подсчетов, измеренных спутником, с излучениями, измеренными самолетом (Kriebel and Amann, 1993). Если использовать только расчеты радиационного переноса (Köpke, 1982), то для получения данных об отраженном солнечном излучении в космос земные цели во время пролета спутника должны быть хорошо известными.

Для косвенной калибровки могут использоваться различные виды целей, например снежные поля, солнечное отражение, однородные районы пустыни, вершины облаков глубокой конвекции для верхнего предела видимого динамического диапазона; поверхность океана при отсутствии облачности в качестве темной цели в видимом диапазоне; и отражатели из уголков для радара с синтезированной апертурой (что требует минимизации погрешности при строительстве и развертывании отражателей, так чтобы поперечное сечение радара было точно известно). Тропический влажный лес отличается удивительной стабильностью и однородностью для микроволновых радиометров и радиолокационных измерителей рассеяния, хотя и имеет некоторую пространственную и временную изменчивость.

Калибровочные испытательные полигоны, такие как Центр исследований климата для измерения атмосферной радиации (ИАР) — пользовательский центр Министерства энергетики США (<https://www.arm.gov/>), где проводятся натурные наблюдения, используются для калибровки спутниковых приборов с высоким пространственным разрешением. Во время ввода в эксплуатацию полетной аппаратуры или через регулярные интервалы времени самолеты пролетают над целевым районом одновременно с прохождением над ним спутника, что позволяет получить дополнительные данные для ретроспективной калибровки.

6.1.6 Взаимная калибровка путем проведения одновременных наблюдений

В ходе взаимной калибровки спутниковых приборов (Chander et al., 2013) сопоставляются скоординированные одновременные измерения по одному прибору относительно измерений по другому прибору. Это делается в следующих целях:

- a) обеспечение косвенной калибровки приборов, у которых нет встроенного калибровочного устройства или оно не такого высокого качества;
- b) слияние данных, полученных с помощью нескольких приборов, для построения однородных временных рядов;
- c) уменьшение систематических ошибок смещения за счет сравнения с очень хорошо откалиброванными приборами, примером может служить взаимное сравнение приборов для формирования ИК изображений с приборами гиперспектрального зондирования.

Важность взаимной калибровки спутников общепризнана. Например, в рамках ИСККП, реализуемого Всемирной программой исследований климата (ВПИК), одновременные наблюдения с геостационарных формирователей изображений и формирователей изображений, установленных на полярно-орбитальных спутниках, выполняются ежемесячно уже в течение более 30 лет в качестве средства нормализации изображений, получаемых с геостационарных спутников (Rossow et al. 1996). Совсем недавно ГСИКС (<https://gsics.wmo.int/site/global-space-based-inter-calibration-system-gsics>) (Goldberg et al., 2011) разработала оперативную методологию для проведения таких взаимных калибровок, конкретно для одновременно проводимых скоординированных наблюдений. Хорошее описание и анализ приводятся в работах Hewison (2013) и Hewison et al. (2013). Эта методология оценивает выбор оптимального соотношения между точным совместным пространственно-временным ориентированием приборов и частотой таких событий, и учитывает поправки, которые необходимо вводить для:

- a) различной геометрии обзора (с учетом как угла сканирования прибора, так и Солнца);
- b) различного состояния атмосферы вдоль линии луча при сканировании, включая аэрозоли и облачность;
- c) различных функций спектральной чувствительности.

Следует отметить, что практически одновременные наблюдения между двумя спутниками на солнечно-синхронных орбитах могут проводиться только в точке пересечения их орбитальных плоскостей, которая всегда расположена в определенный момент по местному солнечному времени и на определенной — обычно высокой — широте. Для наклона в 98° широта пересечения составляет около 70° , когда время пересечения экватора (ВПЭ) двух орбит отличается меньше чем на 8 часов, и опускается значительно, когда разница в ВПЭ возрастает до 12 часов. Пример одновременного надирного наблюдения (ОСН), оперативно проводимого ГСИКС, приведен на сайте <https://gsics.wmo.int/en/objectives>.

6.1.7 Корректировка систематической погрешности измерений в многолетних рядах наблюдений

Для мониторинга изменчивости климата и климатических тенденций необходимы долгосрочные данные, охватывающие десятилетия наблюдений с различных спутниковых приборов. К успешным примерам можно отнести записи температурных трендов, полученные с помощью прибора микроволнового зондирования (MSU) на борту полярно-орбитальных спутников НУОА. Этот прибор измеряет температуру атмосферы от поверхности до нижнего слоя стратосферы при любых погодных условиях, исключая

осадки. Хотя MSU был разработан в первую очередь для мониторинга погодных процессов, его наблюдения широко используются для обнаружения климатических тенденций. Калибровка отдельного прибора сама по себе содержит слишком большую системную ошибку для мониторинга климата. Для уменьшения этой неопределенности был разработан метод взаимной калибровки, основанный на выверках одновременных надирных пролетов (ОНН) (Cao et al., 2004) для приборов MSU на борту спутников НУОА-10, -11, -12 и -14. С учетом геометрии орбиты выверки ОНН ограничены полярными областями, где диапазон яркостных температур меньше глобального диапазона. Тем не менее, полученные калибровочные коэффициенты применяются по всему миру для всего жизненного цикла спутника MSU (например Zou et al., 2009 и содержащиеся в этой работе ссылки). John et al. (2019) провели повторную калибровку формирователей изображений на борту действующих геостационарных спутников с использованием калиброванных наблюдений за излучением с полярных орбитальных спутников с HIRS, а также с гиперспектральных зондировщиков IASI и AIRS. Сравнение повторных калибровок с оперативными калибровками геостационарных формирователей изображений выявило значительные отклонения в оперативных калибровках, которые могут быть скорректированы, чтобы обеспечить полезность данных для мониторинга изменчивости климата.

6.1.8 Использование калибровочной информации

Тип имеющейся калибровочной информации зависит от уровня ее обработки и от рассматриваемого прибора. Каждый прибор имеет свой собственный рабочий режим и цикл калибровки, который включает в себя регулярные измерения калибровочных целей, каждый раз с выполнением определенного числа наблюдений. Для примера в таблице 6.1. показаны циклы калибровки усовершенствованного микроволнового радиометра-А (AMSU-A), микроволнового датчика влажности (МДВ) и инфракрасного датчика с высокой разрешающей способностью-4 (HIRS/4).

Таблица 6.1. Примеры циклов наблюдений/калибровки

	AMSU-A	МДВ	HIRS/4
Число обзоров Земли (наблюдение)	1 линия на 30 пикселей	1 линия на 90 пикселей	38 линий на 56 пикселей
Число обзоров теплой мишени (калибровка)	2 (~300 К)	4 (~273 К)	48 (~290 К)
Число обзоров холодной мишени (калибровка)	2 (глубокий космос ~2,73 К)	4 (глубокий космос ~2,73 К)	56 (глубокий космос ~2,73 К)
Общая длительность цикла	8 с	8/3 с	256 с

Важным шагом в предварительной обработке данных от уровня 0 до уровня 1b является извлечение калибровочной информации. В таблице 6.1 приведен пример для AMSU, где подсчеты теплых/холодных обзоров используются для расчета поверочных коэффициентов в соответствии с калибровочной моделью (такой как линейная или квадратичная калибровочная функция либо таблица преобразования и др.), которая обычно предоставляется оператором прибора на борту. Один из первых примеров описания калибровки AMSU-A представлен в работе Мо (1995).

Для прикладных целей, требующих высокой точности и однородности рядов данных, полученных по различным приборам, может быть применена поправка дополнительно к оперативной калибровке для учета последних результатов проведения взаимной калибровки. Такие поправки предоставляются ГСИКС (см. Goldberg et al., 2011). Откорректированный калибровочный коэффициент может быть включен в уровень 1b/уровень 1,5 форматов данных как дополнительная калибровочная информация.

6.1.9 Сопоставимость результатов измерений из космоса

В то время как взаимная калибровка может обеспечить сопоставимость результатов измерений различными спутниковыми приборами, она необязательно обеспечивает сопоставимость со стандартами СИ, кроме случаев, когда эталонный прибор на орбите является сопоставимым с СИ. Для достижения сопоставимости с СИ на орбите существуют большие проблемы, поскольку большинство датчиков деградируют физически в ходе и после запуска на орбиту. Достижение сопоставимости с СИ представляет собой проблему для конструкторов приборов и остается исследовательской темой для всех видов измерений, за исключением нескольких.

Предложенная программа наблюдения абсолютных значений энергетической яркости и рефракции для исследования климата (CLARREO) (Wielicki et al., 2013) включает космический аппарат с высокоточным инфракрасным радиометром с контрольным абсолютно черным телом с высокой излучательной способностью и с сопоставимой с СИ калибровкой термометра с многократно меняющимися фазу ячейками, а также со спектрометром с рабочим диапазоном в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном частях спектра, калибруемом по Солнцу и Луне, с криогенно охлаждаемым активном резонансном радиометром и датчиком радиозатменных измерений. Этот комплекс приборов должен обеспечивать полностью сопоставимые результаты измерений всего спектра, излучаемого Землей, и отраженного солнечного излучения. Осуществление запуска и поддержание работы такого аппарата предоставило бы опорные точки для поддержки калибровки и сопоставимости со стандартами СИ результатов работы многочисленных оперативных радиометров.

Для сопоставимости результатов измерений можно также воспользоваться преимуществами приборов, которые не зависят от радиометрической калибровки, таких как радиозатменные и солнечные либо звездно-затменные датчики. Однако для использования измерений таких приборов необходимы расчеты радиационного переноса для вычисления излучения для сравнения со спутниковыми наблюдениями. Эти расчеты могут иметь смещение, что в результате приводит к проблеме.

6.2 ВАЛИДАЦИЯ

6.2.1 Факторы, которые необходимо учитывать при проверке качества продукции

Валидация представляет собой процесс оценки с помощью независимых средств точности продукции, полученной в результате измерений космическими приборами. Для валидации данных уровня 1 необходимо глубокое понимание приборов и, следовательно, она должна выполняться оператором прибора при поддержке инженеров по приборам. Валидация продукции (уровень 2) должна выполняться разработчиками продукции после проведения калибровки прибора. Оба процесса должны быть отражены в планах валидации, разработанных для каждого конкретного прибора и вида продукции соответственно (например, Spezzi et al., 2018).

Поскольку валидация геофизической продукции представляет собой сложный и весьма разнообразный процесс, специфичный для многих видов геофизической продукции, здесь достаточно указать его основные аспекты:

- геофизическая продукция производится с использованием спутниковых данных (часто это измерения энергетической яркости) с применением алгоритма, который чаще всего основан на физике. Сравнение полученной продукции с полевыми наблюдениями или результатами моделирования является важной частью процесса для оценки и документирования надежности используемого алгоритма по извлечению данных и для определения области ее применения;

- для многих видов продукции валидация является сложной задачей, поскольку сравнение продукции, полученной на основе результатов космических измерений, или продукции полученной на основе независимого контрольного прибора, часто с использованием измерений *in situ*, подвержено погрешностям, обусловленным несколькими источниками: i) погрешности, присущей продукции на основе спутниковых данных; ii) стандартной погрешности в контрольных данных; iii) погрешности, обусловленной методологией проведения сравнения, часто из-за неодновременного сбора данных в пространстве и времени, так называемой ошибке репрезентативности. Также стоит отметить, что разными методами измерения измеряются различные вещи, например космические наблюдения часто покрывают относительно обширные районы (мгновенное поле зрения) и объем атмосферы и представляют собой почти мгновенные измерения (несколько миллисекунд), в то время как наземные (*in situ*) измерения, как правило, являются точечными измерениями, обобщенными за период времени. Наземное дистанционное зондирование обычно обеспечивает получение информации об атмосферном столбе. Важно, чтобы такая валидация продукции проводилась в соответствии с одним определенным методом усреднения по времени и пространству для обеспечения согласованности.

Модель оценки качества может использоваться для улучшения сравнений за счет понимания и объяснения этих различий и лучшего использования преимуществ и недостатков различных методов проверки качества данных. Обычно проведение проверки качества данных спутниковыми операторами сопровождается подготовкой таких оценочных моделей.

6.2.1 Стратегии валидации

Проверка качества продукции на основе спутниковых данных должна выполняться в соответствии с передовыми методами работы и протоколами, зависящими от переменных величин, например разработанными Рабочей группой КЕОС по калибровке и валидации (<http://ceos.org/ourwork/workinggroups/>). Проверка качества полученных со спутников параметров и продукции может выполняться с использованием следующих хорошо изученных источников:

- a) измерения *in situ* в верхней атмосфере (например, радиозонды);
- b) измерения методами наземного дистанционного зондирования;
- c) сравнение с результатами модели и/или использование при ассимиляции данных;;
- d) пустынные цели;
- e) другая полученная со спутников или смешанные виды продукции схожего типа.

Для использования таких источников проверки качества продукции необходимо, чтобы:

- a) были хорошо известны неопределенности измерения;
- b) учитывались пространственно-временные выборки по разным видам продукции и изначально позволяли проводить взаимные сравнения.

Например, в поддержку подготовки прошедшей проверку качества комбинированной спутниковой продукции на основе данных о температуре поверхности моря (ТПМ) Группа по данным высокого разрешения о ТПМ (ГДВРТПМ) разработала комплексную стратегию проведения валидации, которая включает в себя подробное описание данных, измерений и процесса проведения сравнения. Дополнительную информацию можно получить по адресу: <https://www.ghrsst.org/ghrsst-data-services/services/>.

6.2.2 Валидация данных уровня 1

Валидация рабочих характеристик продукции на уровне 1 затрагивает различные аспекты. Как правило, методики включают перекрестную калибровку с другими приборами (возможно, даже на той же платформе), взаимные сравнения с другими сопоставимыми наблюдениями во время одновременных пролетов в надире (Goldberg et al., 2011), сравнения с наземными наблюдениями и лунную калибровку. Рабочие характеристики продукции на уровне 1В будут проверяться на соответствие геометрическим, спектральным и радиометрическим требованиям для всех географических регионов, включая их сезонную изменчивость. В частности, включены следующие конкретные мероприятия: i) проверка калибровки, ii) валидация радиометрии, iii) проверка геометрии, iv) проверка качества изображения (Phillips et al., 2018). Такие испытания обычно проводятся на этапе ввода в эксплуатацию, то есть в течение ограниченного периода времени. Вместе с тем, эти мероприятия необходимо также проводить в ходе повседневной эксплуатации для того, чтобы поддерживать долгосрочную стабильность калиброванных данных излучения.

6.2.3 Валидация геофизической продукции (уровень 2)

Для валидации продукции уровня 2 требуется независимая продукция от других спутников или наземных измерений (Spezzi и др., 2018). Важным аспектом является сопоставимость временных и пространственных масштабов продукции. Существенное значение здесь приобретает ошибка репрезентативности (Kitchen, 1989). Валидацию также можно провести путем взаимного сравнения с другой продукцией, полученной в результате другой спутниковой программы и прошедшей валидацию. Также полезно проводить сравнения с наземными наблюдениями. Еще одним методом является валидация с помощью моделей ЧПП (см. раздел 6.2.4). Цель валидации заключается в оценке качества продукции с точки зрения прецизионности, точности (смещения), стабильности, а также обеспечения непрерывности/согласованности временных записей о продукции. Успешность валидации в некоторой степени зависит от требований пользователя к продукции, и для некоторых видов применения необходима более строгая валидация, чем для других. Хорошее описание валидации геофизической продукции представлено в работе Loew et al. (2017); в этой работе рассматриваются современные методы валидации данных со спутников и документируются их сходства и различия.

В течение срока действия спутниковой программы продукция обычно претерпевает изменения и совершенствуются алгоритмы, используемые для ее получения. В принципе, после таких изменений необходимо проводить новую валидацию, однако многое может быть охвачено валидацией с помощью системы ЧПП.

6.2.4 Валидация с помощью ЧПП

Опыт показывает, что включение продукции по излучению (уровень 1) или геофизической продукции в систему ассимиляции данных ЧПП является отличным способом валидации спутниковых данных. Это особенно справедливо, когда в основу спутникового прибора положена часто повторяющаяся конструкция, а его предшественники уже использовались в ЧПП. В этом случае уже имеется опыт, позволяющий судить об эффективности измерений, подлежащих валидации. Еще одним преимуществом валидации с помощью систем ЧПП является возможность сравнений для различных географических регионов и сезонов.

Если в системе ассимиляции ЧПП используются новые спутниковые измерения, то требуется больше усилий. Например, для моделирования спутниковых измерений на основе выходных полей модели ЧПП необходимо запрограммировать новый оператор передачи данных.

Огромным преимуществом мониторинга спутниковой продукции в рамках систем ЧПП является также непрерывность такого мониторинга в течение всего срока действия

спутниковой программы. Дополнительные преимущества обеспечивает мониторинг, осуществляемый различными центрами ЧПП, поскольку это может выявить проблемы, присущие конкретной системе ЧПП. Это связано с тем, что поля ЧПП не представляют собой истину как таковую; в частности, в регионах, наименее охваченных наблюдениями, могут присутствовать значительные фоновые ошибки ЧПП. Для получения максимальной пользы из новых спутниковых наблюдений для ЧПП и мониторинга климата обычно требуется время и специальные исследования.

С примерами такого мониторинга для различной продукции можно ознакомиться на веб-сайтах Центров спутниковых применений (ЦСП) ЕВМЕТСАТ, например: <https://www.nwpsaf.eu/site/>; <https://www.romsaf.org>.

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Achieving Satellite Instrument Calibration for Climate Change (ASIC³)*; Report of a Workshop Organized by the National Oceanic and Atmospheric Administration, National Institute of Standards and Technology, National Aeronautics and Space Administration, National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System-integrated Program Office, and Space Dynamics Laboratory of Utah State University; Ohring, G., Ed.; National Oceanic and Atmospheric Administration: Washington, DC, 2007.
- Cao, C.; Weinreb, M.; Xu, H. Predicting Simultaneous Nadir Overpasses among Polar-Orbiting Meteorological Satellites for the Intersatellite Calibration of Radiometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **2004**, 21 (4), 537–542. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2004\)021<0537:PSNOAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<0537:PSNOAP>2.0.CO;2).
- Chander, G.; Hewison, T.; Fox, N. et al. Overview of Intercalibration of Satellite Instruments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, 51 (3), 1056–1080. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2228654>.
- Datla, R. U.; Rice, J. P.; Lykke, K. R. et al. Best Practice Guidelines for Pre-Launch Characterization and Calibration of Instruments for Passive Optical Remote Sensing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* **2011**, 116 (2), 621–646. <https://doi.org/10.6028/jres.116.009>.
- Doelling, D.; Nguyen, L.; Minnis, P. On the Use of Deep Convective Clouds to Calibrate AVHRR Data. In *Optical Science and Technology*, Proceedings of the 49th Annual Meeting of SPIE, the International Society for Optics and Photonics, Denver, USA, 2–6 August 2004; SPIE: Bellingham, USA, 2004; Vol. 5542: Earth Observing Systems IX. <https://doi.org/10.1117/12.560047>.
- Goldberg, M.; Ohring, G.; Butler, J. et al. The Global Space-based Inter-calibration System. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2011**, 92 (4), 467–475. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2967.1>.
- Govaerts, Y.; Clerici, M.; Clerbaux, N. Operational Calibration of the Meteosat Radiometer VIS Band. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2004**, 42 1900–1914. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831882>.
- Hewison, T. An Evaluation of the Uncertainty of the GSICS SEVIRI-IASI Intercalibration Products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, 51 (3), 1171–1181. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2236330>.
- Hewison, T.; Wu, X.; Yu, F. et al. GSICS Inter-Calibration of Infrared Channels of Geostationary Imagers Using Metop/IASI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **2013**, 51 (3), 1160–1170. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2238544>.
- John, V. O.; Tabata, T.; Rüthrich, F. et al. On the Methods for Recalibrating Geostationary Longwave Channels Using Polar Orbiting Infrared Sounders. *Remote Sensing* **2019**, 11, 1171. <https://doi.org/10.3390/rs1101171>.
- Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*; JCGM 200:2012; JCGM: Sèvres, France, 2012.
- Kieffer, H. H.; Stone, T. C. The Spectral Irradiance of the Moon. *The Astronomical Journal* **2005**, 129 2887–2901. <https://doi.org/10.1086/430185>.
- Kitchen, M. Representativeness Errors for Radiosonde Observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **1989**, 115 (487), 673–700. <https://doi.org/10.1002/qj.49711548713>.
- Köpke, P. Vicarious Satellite Calibration in the Solar Spectral Range by Means of Calculated Radiances and its Application to Meteosat. *Applied Optics* **1982**, 21, 2845–2854. <https://doi.org/10.1364/AO.21.002845>.
- Kriebel, K.-T.; Amann, V. Vicarious Calibration of the Meteosat Visible Channel. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **1993**, 10, 225–232. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1993\)010<0225:VCOMTV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0225:VCOMTV>2.0.CO;2).
- Loew, A.; Bell, W.; Brocca, L. et al. Validation Practices for Satellite-based Earth Observation Data across Communities. *Reviews of Geophysics* **2017**, 55, 779–817. <https://doi.org/10.1002/2017RG000562>.
- Meirink, J. F.; Roebeling, R. A.; Stammes, P. Inter-calibration of Polar Imager Solar Channels Using SEVIRI. *Atmospheric Measurement Techniques* **2013**, 6, 2495–2508. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2495-2013>.

- Menzel, P.; Schmetz, J.; Nieman, S. et al. *Intercomparison of the Operational Calibration of GOES-7 and Meteosat-3/4*; NOAA Technical Report NESDIS 73; National Oceanic and Atmospheric Administration: Washington, DC, USA, 1993.
- Mo, T. *Calibration of the Advanced Microwave Sounding Unit-A for NOAA-K*; NOAA Technical Report NESDIS 85, National Oceanic and Atmospheric Administration: Washington, DC, USA, 1995.
- Ohring, G.; Wielicki, B.; Spencer, R. et al. Satellite instrument calibration for measuring global climate change: Report of a workshop. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2005**, *86*, 1303–1314. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-9-1303>.
- Phillips, P.; Bonsignori, R.; Just, D. et al. Calibration and Validation of Level 1B Radiances of the EUMETSAT Polar System – Second Generation (EPS-SG) Visible/Infrared Imager METImage. In Proceedings of SPIE Remote Sensing, Berlin, Germany, 10–13 September 2018; SPIE: Bellingham, USA, 2018; Vol. 10785: Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXII. <https://doi.org/10.1117/12.2325545>.
- Rossow, W. B.; Brest, C. L.; Roiter, M. *International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) Update of Radiance Calibrations* (WMO/TD-No. 736). World Climate Research Programme.
- Schmetz, J.; Menzel, W. P. A Look at the Evolution of Meteorological Satellites: Advancing Capabilities and Meeting User Requirements. *Weather, Climate, and Society* **2015**, *7*, 309–320. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0017.1>.
- Spezzi, L.; Borde, R.; Phillips, P. L. et al. Validation Activities for the Level 2 Geophysical Products of the EUMETSAT Polar System – Second Generation (EPS-SG) Visible/Infrared Imager (METImage). In Proceedings of SPIE Remote Sensing, Berlin, Germany, 10–13 September 2018; SPIE: Bellingham, USA, 2018; Vol. 10786: Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII. <https://doi.org/10.1117/12.2325586>.
- van de Berg, L.; Schmetz, J.; Whitlock, J. On the Calibration of the Meteosat Water Vapor Channel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **1995**, *100* (D10), 21069–21076. <https://doi.org/10.1029/95JD01880>.
- Wielicki, B.; Young, D. F.; Mlynchak, M. G. et al. Achieving Climate Change Absolute Accuracy in Orbit. *Bulletin of the American Meteorological Society* **2013**, *94* (10), 1519–1539. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00149.1>.
- Zhan, Y.; Davies, R. Intercalibration of CERES, MODIS, and MISR Reflected Solar Radiation and its Application to Albedo Trends. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **2016**, *121*, 6273–6283. <https://doi.org/10.1002/2016JD025073>.
- Zhou, G.; Li, C.; Yue, T. et al. An Overview of In-orbit Radiometric Calibration of Typical Satellite Sensors. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*; Copernicus GmbH, 2015; Volume XL-7/W4, 235–240. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W4-235-2015>.
- Zou, C.-Z.; Gao, M.; Goldberg, M. D. Error Structure and Atmospheric Temperature Trends in Observations from the Microwave Sounding Unit. *Journal of Climate* **2009**, *22*, 1661–1681. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2233.1>.