

СПУТНИКОВАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ

*М. С. МАЛКЕВИЧ,
кандидат
физико-математических наук*

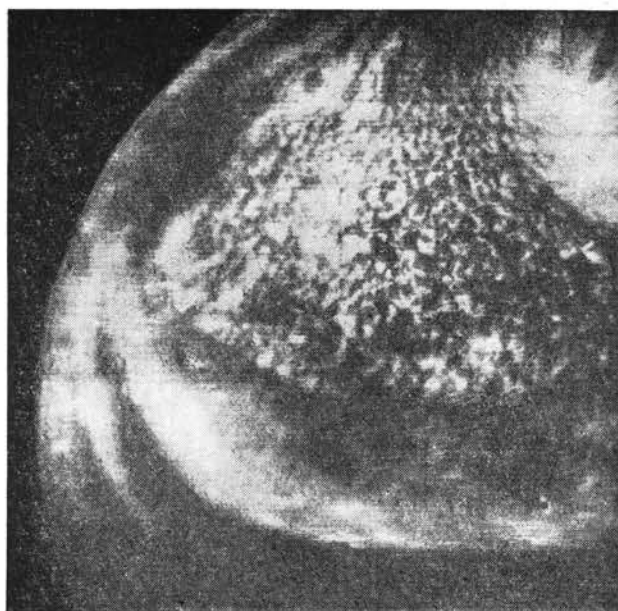


Рис. 1. Система облаков, связанная с циклоном. На фотографии заметна ячеистая структура кучевых облаков

История науки знает немало примеров, когда новые открытия или новые методы исследований революционизировали различные области человеческой деятельности и довольно быстро начинали использоваться в решении практических задач, в том числе и тех, которые не удавалось решить ранее существовавшими методами. Поэтому не удивительно, что запуски искусственных спутников Земли и космических кораблей вызвали бурное развитие не только науки о Космосе — спутники нашли применение и в некоторых чисто «земных» науках. К числу таких наук относятся физика атмосферы и метеорология, которые изучают процессы, происходящие в земной атмосфере и обуславливающие изменчивость погоды. Характер этих процессов всегда требовал глобальных методов исследования, а это как раз и смогли обеспечить искусственные спутники Земли.

ДОСТОИНСТВА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ

Использование спутников в метеорологии связано, по крайней мере, с двумя обстоятельствами. Во-первых, с помощью спутников можно быстро и одновременно на всем земном шаре получать сведения о состоянии атмосферы и происходящих в ней процессах. Такие данные дают представление о невероятно сложном механиз-

ме возникновения и исчезновения тех атмосферных образований, которые ответственны за трудно предсказуемые нерегулярности погоды. Во-вторых, для спутников одинаково доступны как обитаемые территории с их разветвленной сетью метеорологических станций, так и огромные пространства океанов, пустынь, лесных массивов, полярных районов, которые занимают 86—90% поверхности земного шара и являются в метеорологическом отношении «белыми пятнами».

Следует отметить, что применение спутников экономически выгоднее, чем создание густой сети наземных метеорологических станций на всем земном шаре, не говоря уже о том, что практически невозможно создать сеть постоянно действующих станций в океанских просторах и полярных бассейнах.

ЗАДАЧИ СПУТНИКОВОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Метеорологию интересуют характеристики состояния (температура, влажность, давление, скорость ветра) нижних слоев атмосферы до высот 30—50 км. Спутники же летают на значительно больших высотах, не менее 200 км. Как же с помощью спутников измерить метеорологические элементы нижних слоев атмосферы? Оказывается все сведения о характеристиках состояния нижних слоев атмосферы могут быть получены измерением излучения Земли в различных участках спектра. Как известно, в астрофизике давно применяется спектральный анализ для исследования атмосфер звезд и планет. Однако при внешнем сходстве имеется существенное различие в самой постановке задачи в астрофизике и ме-

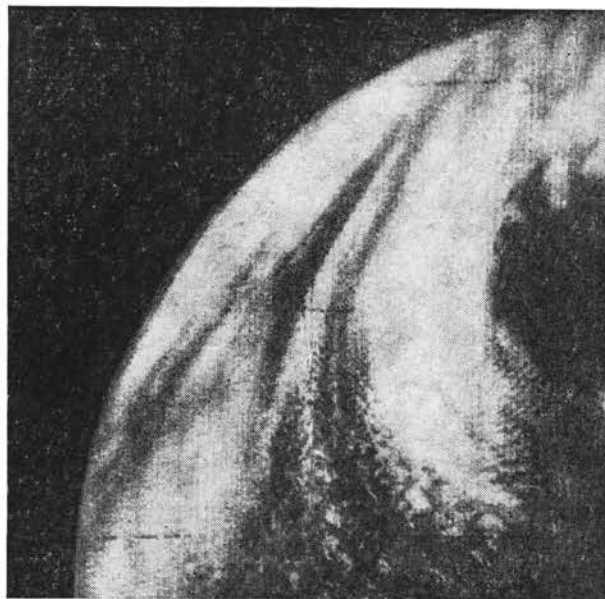


Рис. 2. Фотографии облаков в той же штормовой и соседней с ней областях, что и на рис. 1. полученные сутки спустя

теорологии. В астрофизике важнейшей задачей остается пока установление факта содержания тех или иных веществ и оценки величины их концентрации или температуры.

Земная же атмосфера изучена сравнительно хорошо. Для многих районов земного шара и для разных сезонов известны средние величины большинства из метеорологических элементов. Для метеорологии важно знать изменения этих элементов во времени и в пространстве. Именно они главным образом отражают и определяют нерегулярность погоды на Земле. Совершенно ясно, что определение изменений метеорологических элементов требует высокой точности измерений излучения Земли. Вместе с тем, требуется и очень тонкий анализ этих наблюдений. На помощь приходит большой материал прямых измерений метеорологических

элементов, полученный радиозондированием атмосферы на сети метеорологических станций. Этот материал можно использовать как дополнительную информацию, на основании которой удастся получить представления о структуре полей метеорологических элементов.

Кроме определения метеорологических элементов телевизионная аппаратура, установленная на спутнике, позволяет получить изображение облачного покрова (рис. 1 и 2). Облака — это прежде всего видимое проявление динамических процессов в атмосфере. На дневной стороне Земли облака хорошо видны на фоне более темной водной поверхности или участков суши и льда, не покрытых снегом (на фоне снега облака трудно различимы). Облачность можно обнаружить также и на ночной стороне Земли по контрасту собственного излучения

облаков и земной поверхности в инфракрасной области спектра. Облако будет более «темным», поскольку температура, а следовательно, излучение его верхней границы будет меньше, чем температура и излучение теплой поверхности суши или океана.

Наконец, спутники используются для измерения потоков лучистой энергии, которую Земля теряет в результате отражения солнечной радиации и собственного излучения в мировое пространство. Так как поток солнечной энергии на верхнюю границу атмосферы известен довольно хорошо (ее величина практически постоянна и равна $2 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \text{мин}}$), то по этим измерениям можно определить энергию, оставшуюся на Земле, как разность падающего и уходящего излучения. Эта разность, в конечном счете, единственный источник энергии, обеспе-

чивающий все процессы не только в атмосфере, но также в гидросфере и биосфере.

Мы перечислили три основные задачи физики атмосферы, которые могут быть решены с помощью спутников на современном уровне науки. Естественно, в каждой задаче встречается много трудностей, которые связаны как со сложностью изучаемых явлений, так и с относительным несовершенством существующих методов исследования. Это станет более наглядным при ознакомлении с методами решения некоторых конкретных задач спутниковой метеорологии.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА

Поскольку поверхностная температура Земли около $200\text{--}300^\circ\text{K}$, энергия излучения ее практически вся распределена в спектральном интервале $3\text{--}40\text{ мк}$ с максимумом излучения в области $8\text{--}14\text{ мк}$. Установив на спутнике, направленный к Земле радиометр с достаточно узким углом зрения (рис. 3), можно измерить собственное излучение Земли и по нему определить температуру планеты. Эта температура, называемая радиационной, будет заметно отличаться от истинной температуры, полученной с тем же радиометром в непосредственной близости от поверхности Земли. Различие между радиационной и истинной температурами земной поверхности (или, как выражаются в метеорологии, подстилающей поверхности, имея в виду поверхность суши, воды, снега, лесного покрова и т. д.) достигает 20° . Дело в том, что не все излучение подстилающей поверхности уходит в космическое пространство. Оно сильно поглощается атмосферой (и особенно содержащимися в

ней водяным паром, углекислым газом и озоном) и, кроме того, переизлучается атмосферой, но уже при других температурах (напомним, что температура воздуха убывает на $6\text{--}7^\circ$ через каждый километр). В некоторых спектральных интервалах («окнах прозрачности») атмосфера слабо поглощает и столь же слабо излучает. Строго говоря, полной прозрачности атмосферы нет ни в какой области спектра. Например, в «окне прозрачности» $8\text{--}12\text{ мк}$ содержится довольно много линий поглощения водяного пара и сильная полоса поглощения озона (рис. 4). Можно было бы забрать более узкие «окна», где нет линий поглощения, например, шириной около $0,1\text{ мк}$ вблизи 11 мк . Однако недостаточная чувствительность современных радиометров не позволяет зарегистрировать столь малые энергии. Днем неподходящим оказывается и «окно» в интервале $3\text{--}4\text{ мк}$, свободное от линий поглощения, поскольку собственное излучение Земли в этой области сравнимо с отраженной солнечной радиацией. Поэтому на дневной стороне Земли над сильно отражающи-

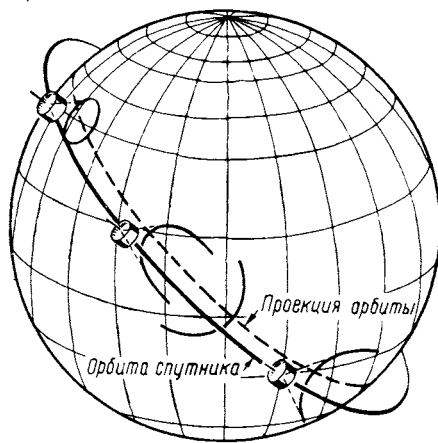
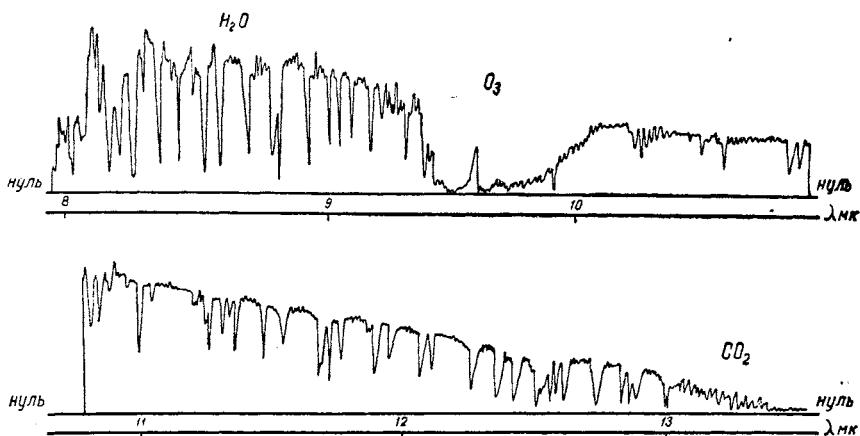


Рис. 3. Схема обзора Земли радиометром, установленным на ИСЗ

ми поверхностями или над облаками радиометр будет измерять суммарную энергию, и радиационная температура получится с большой ошибкой. По этим причинам до сих пор использовалось «окно» $8\text{--}12\text{ мк}$, несмотря на заметное атмосферное искажение собственного излучения подстилающей поверхности.

Итак, непосредственно измеряемое на спутнике излучение состоит из двух частей: из собст-

Рис. 4. Так выглядит солнечный спектр в «окне прозрачности» атмосферы $8\text{--}12\text{ мк}$. Видны многочисленные линии поглощения водяного пара и углекислого газа, а также мощная полоса поглощения озона



венного излучения подстилающей поверхности и из собственного излучения атмосферы. Собственное излучение подстилающей поверхности определенным образом зависит от температуры поверхности Земли. На пути в космос это излучение ослабляется атмосферой. Величина, характеризующая это ослабление, называется функцией пропускания атмосферы и зависит от массы веществ, поглощающих излучение во всем столбе атмосферы.

Собственное излучение атмосферы можно представить в виде суммы излучений каждого слоя при их температуре. При подъеме вверх излучение каждого слоя атмосферы ослабляется в более высоких слоях. Степень ослабления зависит от концентрации поглощающих веществ. Однако распределение температуры и концентрации по высоте непрерывно изменяется и в момент измерения остается неизвестным. Поэтому строгое решение поставленной задачи невозможно, если одновременно не проводится определение, по крайней мере, вертикального распределения температуры и концентрации водяного пара (учет поглощения озона сравнительно прост).

Вот здесь на помощь и привлекается запас данных о температуре и влажности атмосферы, полученный путем радиозондирования в разных районах земного шара. Нужно только постараться использовать этот материал наилучшим образом; взять то, что атмосфера «запоминает» из всего потока информации. Статистическая обработка данных этих наблюдений обнаруживает определенный порядок в структуре распределения температуры и влажности по высоте. Прежде всего можно определить средние за много лет вертикальные профили этих параметров («нормы») для данного района и данного промежутка. Кроме того, существу-

ют корреляционные связи между отклонениями температуры и влажности от соответствующих норм на разных уровнях. Имея эти характеристики вертикальной структуры полей температуры и влажности, можно получить статистически наилучшее приближенное значение температуры подстилающей поверхности.

Теперь рассмотрим атмосферу, как некоторую систему, на вход которой поступает сигнал — излучение земной поверхности, подлежащий определению, а на выходе измеряется искаженный сигнал — излучение Земли вместе с атмосферой. Тогда степень искажения входного сигнала характеризуется так называемой передаточной функцией атмосферы, равной отношению выходного сигнала к входному. Передаточная функция в заданном участке спектра зависит от вертикальных профилей температуры и влажности. В качестве первого приближения можно рассчитать передаточную функцию для «норм» температуры и влажности. Тогда нетрудно получить первое приближение входного сигнала (излучения подстилающей поверхности), разделив выходной сигнал (измеренную величину) на эту передаточную функцию. Зная характеристику прибора, по этому приближению можно найти первое приближение температуры подстилающей поверхности. Но так как среднее значение этой температуры нам тоже известно, то фактически мы определили первое приближение для отклонения температуры от «нормы». Используя далее корреляционные связи этого отклонения на подстилающей поверхности с отклонениями температуры и влажности на других высотах, мы найдем наиболее вероятные значения этих отклонений. Такое восстановление значений функции во всех точках по ограниченному числу ее значений называется оптимальной экстраполяцией

функции. Тем самым мы уточнили вертикальные распределения температуры и влажности, что позволяет вычислить следующее приближение передаточной функции. С ее помощью можно найти дальнейшее приближение температуры подстилающей поверхности.

На первый взгляд может показаться, что повторяя описанные циклы, можно приблизиться к истинным распределениям. В действительности же существенных уточнений мы не получим, поскольку ошибки определения температуры подстилающей поверхности и восстановления профилей температуры и влажности воздуха заранее обусловлены значениями корреляционных связей.

Однако вертикальные профили температуры и влажности могут быть определены более надежно, если измерить некоторые дополнительные характеристики излучения Земли в подходящих спектральных интервалах.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРЫ

В атмосфере некоторые газы имеют известную и постоянную до очень больших высот концентрацию (например, углекислый газ и кислород). Следовательно, если измерить излучение Земли в полосах поглощения этих газов, то неизвестной величиной, от которой зависит излучение, будет только температура воздуха. Более того, если излучение измерять в разных частях полосы поглощения, то можно найти распределение температуры по высоте. Действительно, в той части полосы, где атмосфера достаточно прозрачна, излучение определяется температурой нижних слоев атмосферы. По мере смещения в область меньшей прозрачности излучение будет характеризоваться температурой все

более высоких слоев, поскольку излучение более низких полностью поглощается. Таким образом производится зондирование тропосферы и значительной части стратосферы.

Для решения этой задачи измеряют излучение в полосе углекислого газа (вблизи 15 мк). Излучение в любом участке спектра состоит из суммы излучений той или иной совокупности различных слоев атмосферы. Вклад каждого слоя в общее излучение зависит от его температуры, которую нужно определить, и пропускания атмосферы, которое известно, поскольку концентрация углекислого газа в атмосфере практически постоянна. Следует также иметь в виду, что недостаточная разрешающая способность современной спектральной аппаратуры приводит к необходимости учитывать перекрывание полосы углекислого газа сравнительно слабыми полосами поглощения водяного пара. Концентрация же пара в атмосфере настолько изменчива, что ее лучше определять одновременно с температурой. Но даже независимо от этого определение концентрации водяного пара (удельной влажности) на разных высотах представляет не меньший интерес для метеорологии, нежели определение температуры.

Влажность можно определить по измерениям излучения водяного пара в его полосах поглощения, например, в полосе 6,3 мк. Для этого применимы предыдущие рассуждения, однако на этот раз должна быть известна температура каждого из излучающих слоев атмосферы. Неизвестной же величиной будет пропускание этих слоев, зависящее от неизвестной концентрации водяного пара.

Таким образом, обе задачи тесно связаны между собой. Их надо решать в такой последовательности. Сначала по измере-

ниям излучения в полосе углекислого газа определяют температуру, пренебрегая поглощением водяного пара. Затем с помощью полученной температуры определяют влажность по измерениям в полосе 6,3 мк. Далее можно уточнить температуру, учитывая перекрывание полос углекислого газа и водяного пара в области 15 мк и затем уточнить влажность.

Практическое решение обеих задач сопряжено с двумя главными трудностями. Во-первых, необходима высокая точность измерений излучения в достаточно узких спектральных интервалах (напомним, что для земной атмосферы важны изменения температуры и влажности). Во-вторых, необходимо надежное определение температуры и влажности разных слоев атмосферы из суммы их излучений.

Современная измерительная техника позволяет получить данные с требуемой точностью (во всяком случае, принципиальных препятствий к этому нет). Преодоление второй трудности осложняется тем, что извлечение температуры и влажности слоев атмосферы из суммы их излучений может привести к большим ошибкам и даже к физически бессмысленным результатам, если не принять необходимых мер предосторожности.

Чтобы избежать этих ошибок, нужно использовать сведения о вертикальной структуре полей температуры и влажности атмосферы. Кроме уже упоминавшихся выше корреляционных соотношений можно найти такую систему характеристик вертикальной структуры, через которые любое распределение температуры (или влажности) может быть представлено оптимальным образом. Оказывается, что с помощью такой системы характеристик можно обеспечить представление определяемых величин с наименьшей

ошибкой. Именно это обстоятельство и позволяет получить надежное решение так называемой обратной задачи (в данном случае задачи определения температуры и влажности по излучению, регистрируемому спутником). Рис. 5 иллюстрирует эффективность ис-

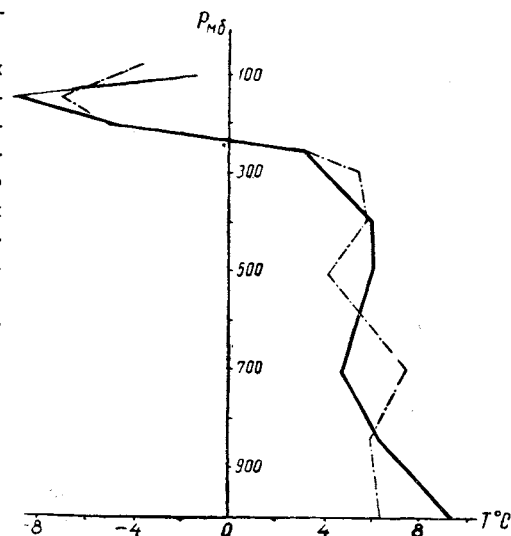


Рис. 5. Пример определения отклонений вертикального профиля температуры от среднего (сплошная кривая — истинная температура, пунктирная — восстановленная)

пользования характеристик вертикальной структуры поля температуры для определения ее высотного хода. Приведенные примеры показывают, что для эффективного использования спутников в метеорологии предстоит решить целый комплекс теоретических и экспериментальных задач.

Однако уже сейчас очевидно, что метеорологические спутники обеспечивают получение таких данных, которые в принципе не могут быть зарегистрированы даже самой густой сетью станций.