

## РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ

УДК 551.590.21:551.510.42

В.Л. Крауклис, Г.А. Никольский, М.М. Сафронова, Э.О. Шульц

### ОБ УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ АЭРОЗОЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Рассматривается совокупность комплексных спектральных, актинометрических и метеорологических данных, полученных в периоды повышенной солнечной активности (1981 и 1988 гг.) с целью выявления передающего звена воздействия солнечных эмиссий на тропосферу. Впервые экспериментально обнаружено свойство водяного пара переходить под воздействием микроволнового, и как вспомогательных факторов, ультрафиолетового и корпускулярного излучений из свободного состояния в связанное (ассоциация в кластерах) и обратно.

Переход молекул водяного пара в связанное состояние влечет за собой уменьшение спектральной оптической толщины в видимой, ближней и ИК-областях спектра, появление и углубление кластерных полос поглощения в области 330–340 нм, 365 и 380–390 нм. Спектральные толщину кластерного поглощения могут превышать 1,0 в области 330–340 нм.

Утверждается, что эффект аномальной прозрачности имеет кластерную природу и реализуется в условиях, определенных С.Ф. Родионовым.

Начатые в 1979 г. измерения оптических и метеорологических параметров атмосферы в горных условиях (3100 м, пик Чегет), были направлены на выяснение изменчивости содержания оптически активных компонент атмосферы в связи с воздействием солнечной активности на нижнюю стратосферу и тропосферу. Первые годы измерения проводились рядом с нейтронным монитором, что позволяло вести непрерывный контроль за вариациями интенсивности космических лучей в ожидании Форбуш-понижений, указывающих на вторжение высокоэнергетических солнечных протонов. Однако ни в период исследований в 1979 г., ни в 1980 г. сильных Форбуш-понижений не произошло. Жесткие погодные условия в эти годы оказали существенное влияние на результаты измерений в связи с тем, что спектрометрическая и регистрирующая аппаратура находилась под открытым небом и, несмотря на примененные меры защиты, подвергалась дестабилизирующим воздействиям. Опыт работы на Чегете показал, что измерения будут обладать требуемой точностью лишь при обеспечении условий работы аппаратуры, характерных для лабораторных помещений. Поскольку измерения должны охватывать период от восхода до захода Солнца, то, очевидно, что измерения должны производиться из вращающейся лаборатории, фронтальная стена которой оснащена иллюминаторами и все время направлена на Солнце. Осуществление такого проекта заняло несколько лет.

Между тем комплексные измерения в горных условиях продолжались, но осуществлялись уже при менее жестких параметрах окружающей среды, поскольку измерения в 1981 г. и в последующие годы проводились только на высоте 2100 м (на Горной астрономической станции ГАО АН СССР ( $\phi \sim 43,8^\circ \text{с.ш.}$ )). В 1981 г. измерения начались в период, когда активность процессов на Солнце была достаточно высокой. В периоды с 25 по 29 июля и 11–12 октября по наблюдениям в линии  $H_\alpha$  и в радиодиапазоне (2; 3 и 5 см) было отмечено большое число хромосферных вспышек. В эти дни погодные условия благоприятствовали проведению спектрометрических измерений на комплексе аппаратуры.

Измерения проводились по возможности с восхода до захода Солнца и состояли из: 1) измерений спектральной прозрачности в области от 300 до 520 нм (УФ-спектрометр); 2) измерений интенсивности рассеянного излучения из ореольной зоны и альмукантарата (универсальный фильтровый фотометр с углом зрения  $1,5^\circ$ ) в восьми узких участках спектра от 390 до 650 нм; 3) измерений потоков в широких спектральных участках и интегрального солнечного излучения, дающих возможность определить мутность атмосферы и общее содержание водяного пара; 4) измерений общего содержания водяного пара (ИК-гигрометр). Такого рода комплексные измерения позволили проследить за влиянием вторжений солнечных протонов и солнечного радиоизлучения на состав (общее содержание оптически активных компонент) и метеопараметры (с привлечением данных радиозондирования) тропосферы и нижней стратосферы.

Совместный анализ данных позволил выявить взаимосвязь между явлениями на Солнце (хромосферные вспышки и радиовсплески) и изменениями высот изобарических уровней 200, 300 и 500 гПа. Изменениями температуры, скорости и направления ветра на этих же уровнях с усилением нисходя-

щих движений воздушных масс в тропосфере (над районом зондирования), с резкими изменениями общего содержания водяного пара и спектральной прозрачности атмосферы.

## 1. Погодные условия в периоды наблюдений в 1981 г.

Метеорологические условия в период наблюдений с 25 по 29 июля и наблюдений 1 и 11–12 октября 1981 г. характеризовались устойчивой, малооблачной погодой. В дни, когда особенно заметно проявился эффект солнечных вспышек — 27 и 28 июля и 11–12 октября — была безоблачная погода. По данным радиозондирования видно, что изменения метеоусловий в период с 25 по 28 июля характерны для прогревающейся однородной воздушной массы и должны вести к ее замутнению, однако в действительности происходило сильное увеличение интегральной прозрачности атмосферы от 0,66–25-го до 0,81 28-го июля. Такое явление наиболее обоснованно можно объяснить подавлением восходящего турбулентного движения прогреваемых масс приземного воздуха нисходящим движением нижнестратосферного воздуха, усиливающимся к 28.07.81 г. до 6 см/с.

Общее содержание водяного пара ( $W$ , см) в атмосфере 28.07.81 г. было очень мало по сравнению с предыдущими и последующими днями. Оно изменялось в пределах от 0,45 до 0,15 см осажденной воды с 7 до 11 ч утра. Для сравнения можно обратиться к данным: 27.07 в эти же часы  $W$  изменялось от 0,4 до 1,0 см, а 29.07 происходил рост общего содержания водяного пара от 0,5 до 1,8 см осажденной воды. По данным радиозондирования за 28.07.81 г. было замечено, что около 9 ч местного времени происходило уменьшение абсолютной влажности на всех уровнях в тропосфере. Очевидно, что в эти часы тропосферная воздушная масса оседала на поверхность 800 гПа, что подтверждается также и соответствующими изменениями профиля направления ветра. Здесь будет уместно заметить, что аэрологические данные свидетельствуют о том, что во второй половине июля над районом проведения измерений располагалась однородная воздушная масса, простирающаяся до тропической тропопаузы на высоте 17 км. Присутствие каких-либо признаков полярной тропопаузы не замечено.

## 2. Привлечение аэрологических данных

Хотя основные оптические наблюдения летом 1981 г. были проведены в период с 26 по 30 июля, к рассмотрению аэрологических условий были привлечены данные за более продолжительный период — с 14 июля по 2 августа с тем, чтобы получить представление о предшествующем и последующем состояниях тропосферы в районе наблюдений. На рис. 1 кроме изменений высоты изобарических уровней 850, 700, 500, 300 и 200 гПа показаны по срокам радиозондирования вариации температуры  $T$  направления  $D$  и скорости  $V$  ветра на уровне 200 гПа.

Анализ аэрологических данных за период с 14 июля по 2 августа 1981 г., полученных при радиозондировании в аэропорту Минеральные Воды, показывает, что в этот период изменение высот изобарических уровней 200, 300 и 500 гПа происходило подобным образом, но с уменьшением амплитуды по мере перехода от уровня 150 к 100 гПа и от 300 гПа к более низким уровням. Этот факт, по-видимому, может быть интерпретирован с точки зрения изменений высоты расположения изобарических поверхностей, температуры воздуха, изменений скорости и направления ветра под воздействием потоков космических частиц. Такое объяснение событий не противоречит результатам работ других исследователей (например, Шурманса и Оорта [1]). На более низких уровнях (700 и 850 гПа) в изменениях высоты наблюдается уже другой синхронизм, отличный от синхронизма изменений на трех верхних уровнях.

В начале периода геоэффективные вспышки на Солнце были единичными и поэтому последствия их воздействий можно было обнаружить на уровнях 200 гПа, 300 и 500 гПа. Выявлению этого воздействия также способствует отсутствие трендовых тенденций во временном ходе метеопараметров  $H$ ,  $T$ ,  $V$  и  $D$  15 и 16 июля. На геоэффективных долготах вспышки 1N (по пятибалльной системе S, 1, 2, 3, 4 обозначают площади вспышек, а  $F$ ,  $N$ ,  $B$  — соответственно слабая, средняя и яркая вспышки) 14, 15 и 16 июля, по-видимому, явились причиной возмущений в значениях  $H$  вблизи соответствующих моментов времени (например, в 18 ч 14.07 и в 6 ч 16.07). Увеличения  $H$  (для 200 гПа) 14–16 июля происходили на фоне среднего значения  $H = 12370$  м и достигали 40–50 м, но вспышка 17 июля (2N), по-видимому, оказала более существенное воздействие на барическое поле в верхней тропосфере — произошло снижение уровня 200 гПа за сутки на 130 м. Понижение температуры до  $\sim 2^\circ\text{C}$  также было существенным, но началось и закончилось оно с запозданием на 6 ч. С задержкой еще на 6 ч отреагировала скорость ветра, снизившись на 30 м/с. Направление ветра 18.07 изменилось с  $250^\circ$  до  $320^\circ$ . Возвращение ветра на направление  $\sim 250^\circ$  окончательно произошло лишь 29.07.98 г. Скорость ветра  $V$  после минимума 18.07 в 12 ч, по Гринвичу, стала расти и за двое суток поднялась до 42 м/с, но вспышки 1 N и 1 B 21.07 привели к возникновению асинхронных изменений  $H$  и  $V$ ;  $H$  продолжала расти, а  $V$  снизилась от 37 до 23 м/с. Возникшая асинхронность хода  $H$  и  $V$  продолжала существовать до конца периода, получив наибольший размах 28 и 29 июля. В асинхронном волнообразном ходе  $H$  и  $V$  одновременно принимали экстремальные значения —  $\Delta H$  достигало 225 м, а  $V$  снижалось до 7 м/с. При этом изменение высоты уровня 300 гПа также было весьма существенно  $\Delta H = 220$  м.

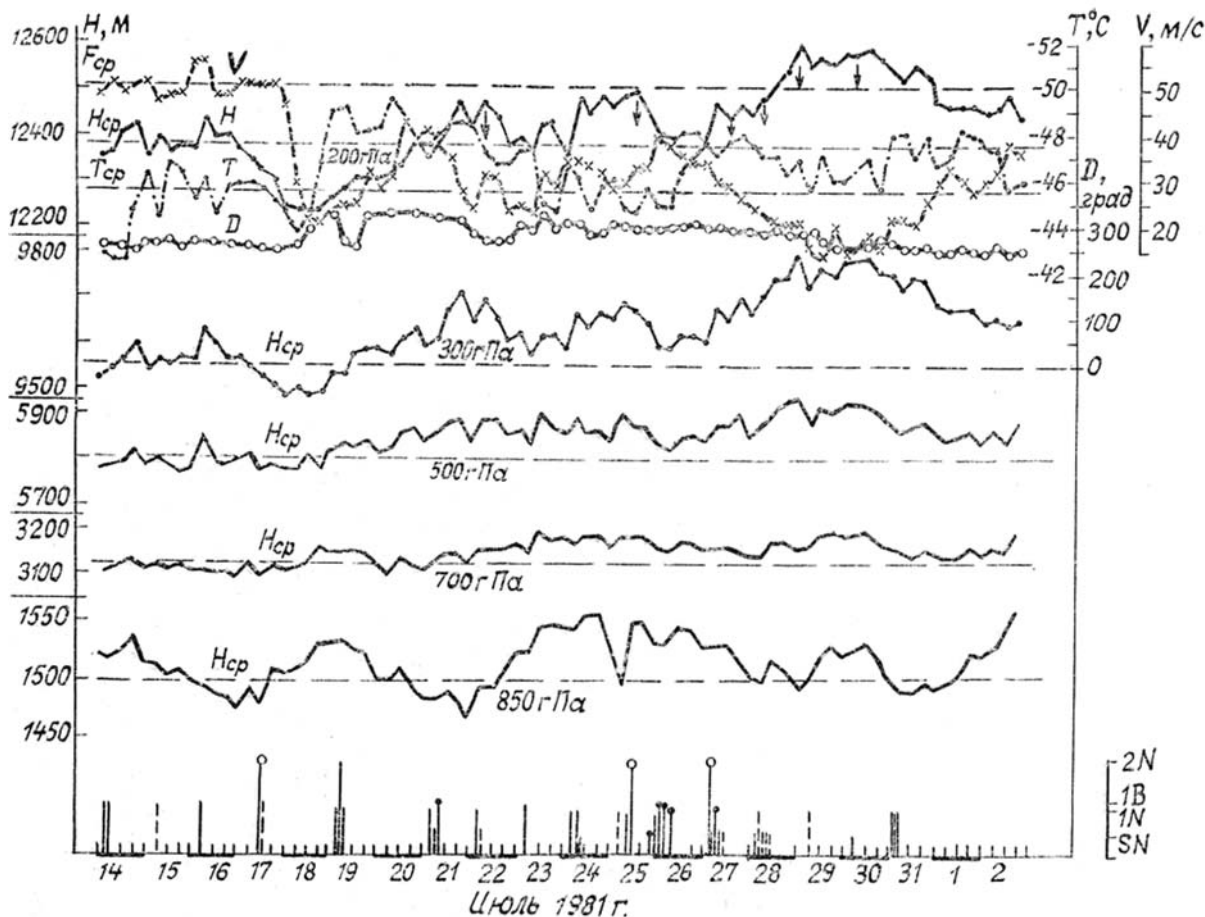


Рис. 1. Изменение высот изобарических уровней 850, 700, 500, 300, 200 гПа и изменение температуры, скорости и направления ветра на уровне 200 гПа с 14 июля по 2 августа 1981 г. по данным радиозондирования над Минеральными Водами. Над осью абсцисс в относительном масштабе представлены положения (на временной шкале) и мощности вспышек. Справа показана относительная шкала мощности вспышек

Как видно из рис. 1, на уровне 200 гПа 18 июля произошло резкое снижение температуры, составляющее  $5,5^{\circ}\text{C}$ . В последующие дни происходило повышение температуры воздуха. К 25 июля температура повысилась до  $-44,5^{\circ}\text{C}$ , а в последующие дни удерживалась вблизи  $-46-47^{\circ}\text{C}$ .

Сопоставление деталей временного хода  $H$ ,  $T$ ,  $V$ ,  $D$  дает такую же последовательность протекания их отклика на возмущения атмосферы после солнечной вспышки. Реакция параметров разделяется 6-часовыми периодами, определяемыми сроками радиозондирования. Реальные интервалы опережения-запаздывания, по-видимому, могут изменяться на  $\pm 3$  ч. Полученная последовательность откликов проявляется на протяжении 6–30 ч. Нас же интересуют изменения  $H$ ,  $T$ ,  $V$  на временных масштабах порядка 2–8 сут (волнообразный ход) и реализующиеся при этом связи.

Если обратить внимание на быстрое изменение параметров  $H$ ,  $T$ ,  $V$  17 июля, то очевидно, что изменения в  $H$  распространялись вниз на те же изобарические уровни (300 и 500 гПа), что и при возмущениях  $H$  14 и 16 июля. Это обстоятельство позволяет высказать соображение, что изменения  $H$ ,  $T$ ,  $V$  17 июля также могут быть отнесены к последствиям воздействий солнечных вспышек. Проследивание вариаций  $H$  на 200, 300 и 500 гПа дает основание для утверждения о перманентной реакции тропосферы на вспышки 16 и 17 июля.

Осмыслив в первом приближении процессы в верхней тропосфере 15–19 июля, перейдем к последствиям новой серии вспышек, начавшейся 21 июля и имевшей максимум 25–27 июля (см. графическое распределение вспышек во времени в нижней части рис. 1). Если обратить внимание на  $H$  и  $V$ , то видно, что они как бы образуют три пучности 21–23, 24–25 и 27–31 июля, в пределах которых скорость ветра уменьшается, а давление возрастает. Это означает, что должны возникать нисходящие потоки, приносящие в нижние слои более сухой воздух и препятствующие развитию восходящих турбулентных потоков влажного воздуха из горных долин и ущелий,

Согласно [1, 2], воздействие солнечной вспышки мощностью в два балла и более проявляется в изменении давления в средней и верхней тропосфере в течение шести часов после вспышки. В средних широтах воздействие вспышек имеет очаговый характер и в большинстве случаев ведет к росту давления и, следовательно, к оседанию воздушных масс в местах с максимальным воздействием. Воз-

действие проявляется также в изменении температуры, скорости и направления ветра. Максимальное значение температуры воздуха было обнаружено на уровне 500 гПа на +1,1°, а на уровне 200 гПа — понижение температуры на 1,8°C [2]. Очевидно, что и наибольшие изменения скорости ветра происходят на уровнях 300–500 гПа. В рассматриваемый период (см. рис. 1) изменения температуры достигали –2,5ч–4°C, что существенно превышает литературные данные (–1,8°C), поскольку в летний период и на более низкой широте (43,8°) воздействие вспышек должно быть меньше [1]. Над Минеральными Водами вблизи уровня 200 гПа, где находится фотцеровский максимум ионизации воздуха космическими лучами, наблюдалось такое же большое (~220 м), как и на 300 гПа, увеличение высоты изобарической поверхности.

Может возникнуть сомнение, что найденные изменения  $\Delta H$ ,  $\Delta T$  и  $\Delta V$  относятся к воздушной массе, трансформируемой солнечными космическими лучами, а не появились в результате прихода гребня в поле высокого давления. Однако сделанные выше сопоставления вариаций по конкретным аэрологическим данным с взятыми из [1, 2] показывают, что влияние солнечных вспышек на атмосферные параметры в полученных результатах достаточно достоверно. Это подтверждают данные оптического зондирования толщи атмосферы, находящейся выше уровня расположения наблюдательной станции.

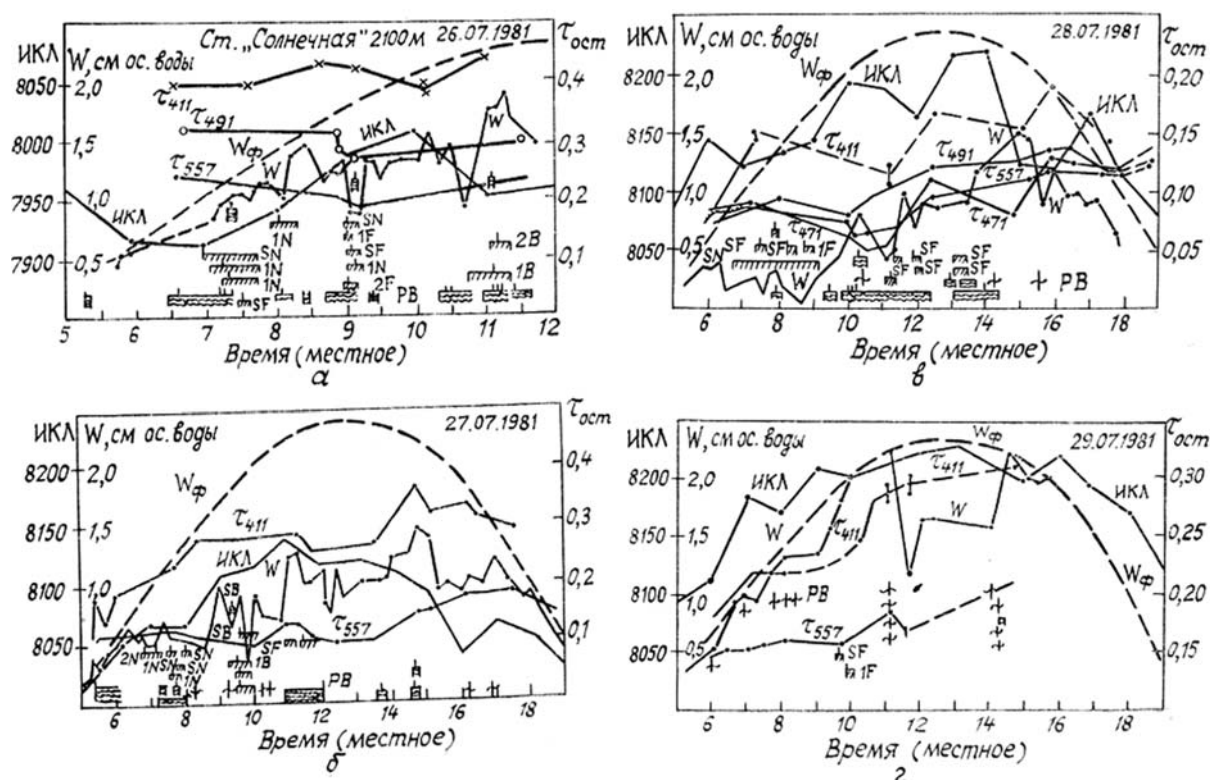


Рис. 2. Дневной ход спектральных остаточных толщин на длинах волн 411, 471 и 557 нм и общее содержание водяного пара выше уровня 2,1 км в сопоставлении с дневным ходом часовых сумм интенсивности космических лучей (ИКЛ), по данным нейтронного монитора в г. Тбилиси: а—26.07.1981; б—27.07.1981; в—28.07.1981; з—29.07.1981. В нижней части рисунков представлены длительность и мощность вспышек и радиовсплесков (PB) на Солнце

### 3. Результаты оптических наблюдений

Как было упомянуто выше, в 1981 г. измерения спектральных оптических плотностей толщи атмосферы ограничивались областью спектра от 400 до 650 нм и сопровождалась измерениями общего содержания водяного пара (ИК-гигрометр), прозрачности и мутности атмосферы. На рис. 2 и 3 показаны последовательные углубления процесса трансформации общего содержания водяного пара  $W$  и спектральных оптических толщин под воздействием увеличивающейся частоты и мощности вспышек на Солнце в периоды 26–28 июля и 11–12 октября 1981 г. На рис. 2 показаны четыре дневных хода (за 26–29 июля) дискретных наборов измеряемых и привлекаемых для анализа параметров, компоненты которого демонстрируют взаимосвязанность оптических и микрофизических явлений и солнечно-космических факторов, включающих результаты почасового счета нейтронного компонента на мониторе космических лучей (КЛ) в г. Тбилиси, временную последовательность солнечных вспышек (2N, 1B, 1N, SF, SN) и наиболее мощных радиовсплесков (PB). Легко проследить наличие достаточно высокой корреляции между временным ходом интенсивности космических лучей (ИКЛ) и ходом значений общего содержания  $W$ , находящегося выше уровня станции. В достаточно хорошем

согласии между собой и с  $W$  находятся остаточные (вычтено молекулярное рассеяние) спектральные оптические толщины  $\tau_{411}$ ,  $\tau_{471}$  и  $\tau_{557}$  ( $\lambda = 411, 471$  и  $557$  нм). Очевидно, что наибольшие вариации по амплитуде характерны для  $W$  и что за них ответственны солнечные вспышки и всплески радиоизлучения на частотах 2950 – 15000 МГц.

Интересно проследить за различием величин  $W$  и  $W_{\text{ф}}$ , последняя из которых прогнозирует дневной ход общего содержания водяного пара в фоновых условиях летней (июльской) безоблачной погоды в отсутствие влияния возмущающих факторов. В периоды, когда отсутствуют вспышки и радиовсплески, например, от 9 ч 10 мин до 9 ч 30 мин 29.07  $W$  быстро возрастает, стремясь выйти на уровень  $W_{\text{ф}}$ , отвечающий данному моменту времени. 27.07 подобная попытка «удалась» лишь в 18 ч. Практически весь этот день  $W \sim W_{\text{ф}}/2$  (от 6 ч 30 мин до 17 ч 30 мин).

Следует отметить, что прямое и быстрое воздействие на атмосферу оказывают, по-видимому, не только протонные вспышки (1В и 2В), но и выбросы быстрых электронов, сопровождаемые радиовсплесками – резкими и мощными увеличениями микроволнового излучения из активных областей, которые также приводят к изменениям  $W$  и  $\tau_{\text{ост}}$ . Подтверждением сказанному могут служить события 29 июля, которые представляются нам чрезвычайно важными на том основании, что по независимым измерениям обнаружена замечательная синхронность возникновения серии радиовсплесков на Солнце и существенных изменений в общем содержании водяного пара около 11 и 14 часов. Очень наглядно отреагировала на 11-часовые радиовсплески, а точнее, на последовавшее снижение  $W$  спектральная толщина  $\tau_{557}$ . В предшествующие дни также можно отметить ряд очевидных воздействий всплесков и радиовсплесков на ход  $W$  и  $\tau_{\lambda}$ . Так, 26.07 на серию всплесков и радиовсплесков (около 9 часов) резко отреагировали  $W$  и  $\tau_{491}$ . Заметим, кстати, что другие  $\tau_{\lambda}$  также откликнулись на событие, но измерения велись последовательно по 8-ми каналам, из которых только в одном достаточно подробно зафиксировано рассматриваемое событие. Два аналогичных события произошли (около 8-ми и 10-ти часов 27.07). Обратимся теперь к событиям 28 июля, когда был достигнут максимальный эффект воздействий. Действительно, содержание водяного пара в утренние часы (при сохраняющемся типе погоды) оказалось чрезвычайно низким, около 0,2 см ос. воды. Несомненно, что такое снижение  $W$  является необычным даже при интенсивном нисходящем движении в антициклоне. К утру 28.07 скорость нисходящего движения воздушной массы в нижней стратосфере и верхней тропосфере достигла максимального значения – 6 см/с. По-видимому, следует сделать предположение об акцентации вертикального движения под воздействием солнечных всплесков.

Наблюдения 29.07 (рис. 2, з) проходили при значительном снижении солнечной активности. В течение дня произошли только две вспышки малой мощности (около 10 ч) и, по-видимому, слабой геоэффективности. Ход  $W$  до 11 ч имел лишь одно и не очень сильное возмущение, которое можно отнести за счет радиовсплесков в 8 ч 20 м. Но вскоре после 11 ч обычный дневной ход  $W$  был нарушен. Содержание водяного пара с 2,2 см ос. воды, резко снизившись, вышло на уровень 1,6 см, на котором и продержалось до 14 ч. За последующие 30 мин  $W$  поднялось до максимального для этого дня значения – 2,2 см. Изменения в  $W$  в период с 10 ч до 13 ч достаточно синхронно повторены  $\tau_{557}$ . Анализ сводки событий на Солнце [3] показал, что началу спада и подъема  $W$  определенно соответствуют отдельные серии сильных радиовсплесков 11 ч 06 мин (8 ч 06 мин UT) и 14 ч 13 мин (11 ч 13 мин UT). Периоду спада соответствуют радиовсплески на длинах волн 2–5 см, а освобождению молекул  $\text{H}_2\text{O}$  из «кластерного плена» – всплески на 3–10 см [3].

Второй период наблюдений в 1981 г. с 1 по 12 октября также был богат вспышками и радиовсплесками. На рис. 3 скомпонованы данные за 1, 11 и 12-е октября, содержащие наиболее важную информацию. На рис. 3, а и 3, б представлены данные за 1-е сентября в виде дневного (3, а) и спектрального хода остаточных толщин (3, б). На рисунке с дневным ходом еще представлены интегральная прозрачность  $P_2$  и общее содержание водяного пара по прибору с широкополосными фильтрами ( $W_{\text{акт}}$ ). Невысокая прозрачность атмосферы проистекает из-за сравнительно больших величин  $W$ , колеблющихся вокруг среднего значения 1 см ос. воды. Привлекают внимание специфические колебания и снижение  $\tau_{411}$ , поддерживаемое снижением  $W$  и  $\tau_{471}$ ,  $\tau_{557}$  в период от 9-ти до 10-ти ч 30 мин. Нет сомнения, что эти изменения происходят в связи со вспышкой 1 F. Соответствующее изменение  $W$  составило:  $W = 0,36$  см ос. воды. На рис. 3, б кривые 1 и 2 демонстрируют сдвиг спектрального хода оптических толщин между 9 и 10 ч как результат воздействий не очень мощной вспышки (1 F) на оптические толщины тропосферного воздуха. Снижение  $\tau_{\text{ост}}$  составило 0,013 на  $\lambda = 500$  нм, 0,02 для  $\lambda = 650$  нм и 0,03 для  $\lambda = 411$  нм.

К зависимостям 3, 4 и 5 на рис. 3, б мы еще вернемся, а сейчас рассмотрим данные за 11 и 12 октября, которые демонстрируют еще более сильное воздействие всплесков и радиовсплесков на тропосферу, чем 27–28 июля. Низкие значения и резко изломанный ход  $W$  11.10.81 г. тесно связаны с большим числом и неритмичным следованием всплесков. Все характерные особенности воздействий хорошо прослеживаются после каждой группы всплесков не только в  $W$  (быстрые спады и попытки восстановления), но и в  $\tau_{\lambda}$ . Более частая регистрация  $\tau_{557}$  позволяет проследить реакцию  $\tau_{\lambda}$  на каждую группу и даже на отдельные вспышки.

Исключительный интерес представляют данные за 12 октября, которые свидетельствуют о сильнейшей пертурбации активных компонентов тропосферы и, естественно, ее оптических характери-

стик. Совместное воздействие сильных вспышек (2В и 3В) и многочисленных и мощных радиовсплесков привело оптические характеристики тропосферы в аномальное состояние. До полудня общее содержание водяного пара оставалось на уровне 0,15 см ос. воды. Особенно впечатляюще явление, которое ранее никогда не встречалось в измерениях, связано с обратным порядком расположения  $\tau_{411}$ ,  $\tau_{471}$ ,  $\tau_{557}$  на шкале остаточных (аэрозольных) оптических толщин и чрезвычайно низкими значениями  $\tau_{411}$  (~0,01) и  $\tau_{471}$  в полдень. Такая сверханомальная прозрачность в ультрафиолете должна быть связана либо с практически полным удалением субмикронной фракции аэрозоля из толщи атмосферы, либо с 20%-м всплеском УФ-излучения Солнца. В связи с последним предположением вызывает особый интерес подскок  $W$  между 12-ю и 13-ю часами, но этот аспект требует отдельного рассмотрения.

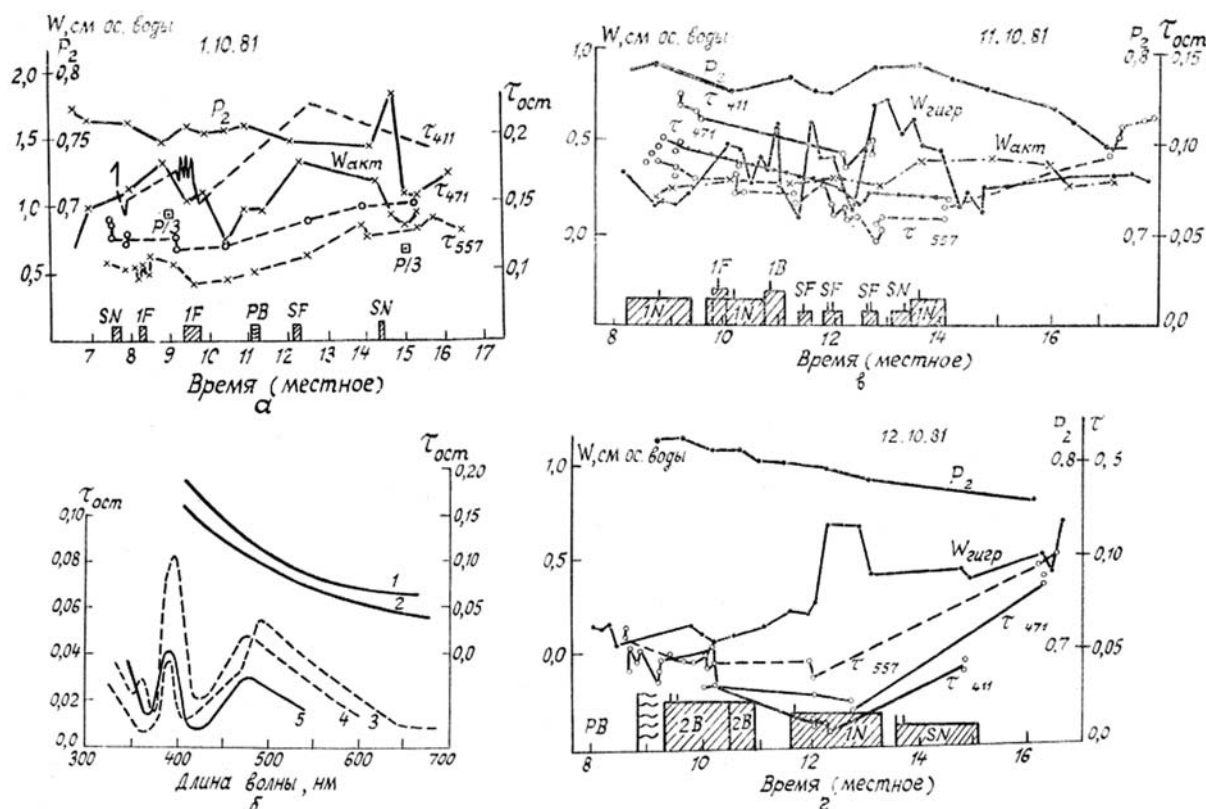


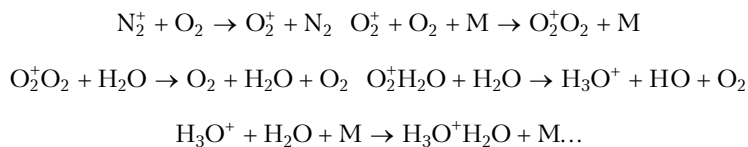
Рис. 3. Дневной ход спектральных остаточных толщин на длинах волн 111, 471, 557 нм, интегральной прозрачности  $P_2$  и общего содержания водяного пара  $W_{\text{акт}}$  по широкополосному фильтровому актинометру. Наблюдения 1.10.1981 (а); 11.10.1981 (б); 12.10.1981 (в). На оси абсцисс показаны вспышки и радиовсплески. Спектральный ход остаточной толщины слоя атмосферы выше 2,1 км (д): 1—9 ч 1.10.1981; 2—10 ч 1.10.1981; 3 — по измерениям на ст. «Солнечная», 1986—1987 гг.; 4 — по измерениям на ст. Маунт Вилсон, 1920 г.; 5 — по измерениям на ст. Калама, 1920 г., Южное полушарие. Различие кривых 1 и 2 связано с быстрым падением  $W$  (см. 3, а).

Вернемся к рис. 3, б. Кривые 3, 4 и 5 характеризуют спектральный ход остаточной толщины в условиях высокой прозрачности в горной местности. Кривая 3 синтезирована по результатам наших измерений в 1980 и 1986 гг. Кривая 4 получена по данным за период 1918—1920 гг. на станции Маунт Вилсон, а кривая 5 на ст. Калама (Южное полушарие, тот же период). Очевидно, что в этих случаях получены весьма характерные спектральные зависимости  $\tau_{\text{ост}}$ , имеющие высокую степень подобия. Резкие изменения величин  $\tau_{\text{ост}}$  свидетельствуют, что максимумы ослабления в областях 480, 390, 360 и 340 нм связаны с поглощением, а не рассеянием. Аналогия в структуре ослабления указывает на распространенность найденных спектральных зависимостей, характерных для фоновых условий атмосферы в высокогорье.

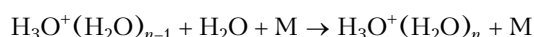
Случаи появления полос ослабления (20% наблюдений) с максимумами вблизи 330, 360 и 380 нм были отмечены в начале 80-х гг. Г.А. Алексеевой (ГАО) [4]. По данным многочисленных высокогорных наблюдений за спектральной прозрачностью с использованием стандартных звезд было выяснено, что появление, интенсивность и ширина полос сильно зависят от содержания водяного пара над пунктом наблюдений. Эти полосы ослабления (поглощения) и полосу около 480 нм мы связываем с существованием в тропосфере (не только в ночных, но и в дневных условиях) кластерных комплексов.

#### 4. О механизмах солнечных воздействий

Процесс трансформации (ассоциации) молекул водяного пара в средней и верхней тропосфере (4–14 км) под воздействием высокоэнергетичной ионизирующей компоненты солнечного корпускулярного излучения (СКЛ) может осуществляться по следующей схеме (предложенной для мезосферы Ф. Фезенфельдом и Е. Фергюсоном в 1969 г. [5] и распространенной на стратосферу. П. Виноградовым и др. в 1980 г. [6]):



При дальнейшем росте степени ассоциации, определяемой температурой воздуха и концентрацией водяного пара в слое поглощения СКЛ, имеем:



Если предположить, что близкие количества молекул  $H_2O$  сосредотачиваются в двух ансамблях отрицательных ионных кластеров  $HCO_3^-(H_2O)_{m_1}$  и  $NO_3^-(H_2O)_{m_2}$ , то есть  $m_1 + m_2 \approx n$ , тогда число ассоциированных молекул  $H_2O$  составит  $2n \cdot p$ , где  $p$  — число актов ионизации. Из недавних исследований выяснилось, что степень ассоциации водных кластеров в некоторых случаях достигает  $n = 70$ . В связи с этим и для удобства дальнейших оценок положим, что  $n = 50$ .

В связи с тем, что ассоциация молекул  $H_2O$  происходит на длине пути 10 км, а среднее время жизни ионов оценивается около 150 с, для объединения в комплексы  $1,2 \cdot 10^{22}$  молекул  $H_2O$  (0,36 см ос. воды, случай 1.10.1981 г.) необходимо произвести за 1 с в столбе атмосферы единичного сечения (между 4-мя и 14-ю км)  $8 \cdot 10^{17}$  актов ионизации. Так как средний потенциал ионизации молекул воздуха равен 35 эВ, то суммарная энергия быстрых СКЛ должна составить  $3,5 \cdot 10^{19}$  эВ (с учетом, что на ионизацию молекул быстрая частица отдает около 80% энергии). Таким образом, эффект трансформации водяного пара мог бы быть создан частицами с суммарной энергией  $3,5 \cdot 10^{19}$  эВ, пересекающими в нижней стратосфере через одну секунду индивидуальные площадки в  $1 \text{ см}^2$ . Наиболее простой подход — малое число высокоэнергичных частиц — может показаться наиболее привлекательным для объяснения трансформации водяного пара, но, как следует из измерений на Якутской установке ШАЛ [7], число частиц с энергиями  $10^{17} - 10^{19}$  эВ чрезвычайно мало и ни одна из таких частиц не связана с Солнцем. В ряде работ, например [8], указывается, что энергия СКЛ (протонов) даже в предельных случаях не превышает нескольких десятков гигаэлектронвольт. Таким образом, приходится констатировать, что солнечный корпускулярный компонент не обладает необходимой плотностью потока, чтобы инициировать работу физического механизма, лежащего в основе обнаруженного явления трансформации водяного пара, хотя ракетные и спутниковые данные свидетельствуют о том, что после мощной хромосферной вспышки магнитосфера Земли наводняется частицами с энергиями 0,1–1 ГэВ. Однако перекрытие девяти порядков в суммарной энергии, необходимой для ионизации достаточного числа молекул азота, за счет увеличения числа частиц, участвующих в процессах ионизации, очевидно, не осуществляется.

Вернемся к данным, представленным на рис. 2, з, возможно, свидетельствующим об особой роли солнечного радиоизлучения сантиметрового диапазона в микрофизическом состоянии молекул водяного пара. События в дневном ходе указывают, что радиовсплески, по-видимому, управляют состоянием значительной части водяного пара, находящегося в средней и верхней тропосфере и в нижней стратосфере. Как уже упоминалось выше, периоду спада  $W$  соответствуют всплески радиоизлучения на длинах волн от 2 до 5 см, а периоду возврата молекул  $H_2O$  к свободному состоянию — радиовсплески в диапазоне 3–10 см.

Как показали недавние исследования спектра всплесков радиоизлучения в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц [9], в 80% случаев всплески радиоизлучения имеют в частотном спектре одновременно несколько пиков, положение которых на шкале частот практически неизменно в течение времени существования радиовсплеска. Учитывая эти обстоятельства, можно надеяться, что радиовсплески обладают возможностями возбуждающего воздействия из-за наличия двух или более компонент с близкими и вполне определенными частотами. Явление широкополосного возбуждения, обнаруженное А.В. Еньшиным и С.Д. Твороговым [10] при работе с лазерными источниками бигармонического излучения, позволяет по-новому взглянуть на взаимодействие микроволнового излучения со средой.

Следует заметить, что синергизм в рассматриваемых воздействиях солнечных эмиссий на микрофизическое состояние водяного пара, по-видимому, не ограничивается только влиянием радиовсплесков, но поддерживается всплесками ультрафиолетового излучения, сопровождающего солнечные вспышки.

В связи с тем, что процесс трансформации водяного пара длится, после фиксации события на Солнце в течение 15–20 мин, можно предположить, что и квазирелятивистские протоны и нейтроны солнечного происхождения также принимают посильное участие в обнаруженном явлении сравнительно быстрого изменения концентраций водяного пара в верхней тропосфере и, как следствие, быстрого изменения оптических характеристик атмосферы в УФ-, видимой и ИК-областях спектра.

## 5. О природе аномального ослабления в ультрафиолете

Кроме внешних причин возникновения аномальных особенностей ослабления солнечного излучения следует обратить внимание также и на локальные метеорологические условия, которые способствуют возникновению сильных аномалий в ослаблении УФ-излучения. В дополнение к результатам, опубликованным в [11], в 1988 г. были получены убедительные свидетельства кластерной природы аномального ослабления в области спектра 330–400 нм.

В одной из основных работ С.Ф. Родионова [12] по исследованию эффекта аномальной прозрачности (для  $\lambda < 330$  нм) и обычно сопровождающего этот эффект явления аномального высокого ослабления в ближнем УФ-диапазоне указывается, что возникновение эффекта (при хорошей оптической погоде) имеет место в 80% дней наблюдений, и обязательно при достаточной увлажненности воздуха в средней и нижней тропосфере. Следует, по-видимому, напомнить, что С.Ф. Родионов проводил спектрометрические наблюдения на пике Терскол и Приюте 11-ти, то есть практически на склоне Эльбруса. Возможно, что локальные метеоусловия способствовали большей повторяемости эффекта аномальной прозрачности.

Сечения поглощения больших водных кластеров в диапазоне спектра 330–380 нм (оценка)

$\lambda$ , нм	$\sigma \times 10^{21}$	$\lambda$ , нм	$\sigma \times 10^{21}$	Примечание
331	$4,0 \pm 2,5$	352	$3,4 \pm 2,5$	Принято, что $n = 50$
333	$4,3 \pm 2,5$	360	$3,1 \pm 2,0$	
336	$4,1 \pm 2,5$	370	$3,0 \pm 2,0$	
340	$3,9 \pm 2,5$	380	$2,4 \pm 2,0$	
347	$3,7 \pm 2,5$			

Комментируя возможность и условия возникновения эффекта, Г.П. Гушин [13] приводит спектральный ход ослабления в области 300–400 нм, рассчитанный по измерениям Родионова. Кривая имеет максимум вблизи 380 нм ( $\tau_d \approx 1,84$ ) и резкий спад при  $\lambda < 330$  нм. Г.П. Гушин и Г.В. Розенберг в 60-х годах объясняли эффект аномальной прозрачности влиянием многократно рассеянного света, попадающего в апертуру прибора после кратного рассеяния на молекулах и частицах в атмосфере. В одной из своих последних работ Г.В. Розенберг [14] признал за аномальной прозрачностью право на существование, но Г.П. Гушин не отступает от своих прежних позиций, хотя в его же работе [13, с. 92, рис. 3.16] приводятся данные о том, что многократное рассеяние проявляется при массах атмосферы  $m > 15$  (при апертуре  $\omega = 5'$ ) и при массах  $m > 6$  (при  $\omega \approx 30'$ ). По нашему мнению, эти условия предоставляют эффекту аномальной прозрачности достаточную свободу для самовыражения, если оставаться в диапазоне масс  $m < 6$ . Обращаясь к данным [13], можно без труда подтвердить наличие эффекта для области спектра с  $\lambda \leq 330$  нм.

Результаты измерений 16.10.88 г., полученные нами на ст. Солнечная (рис. 4), отчетливо демонстрируют не только эффект аномального ослабления в области спектра 330–380 нм, но и динамику движения спектрального максимума ослабления в течение дня. Резкое падение спектральных толщин при быстром росте общего содержания водяного пара между 10-ю и 11-ю часами связывается нами с распадом кластеров с высокой степенью ассоциации, что представляет возможность оценить сечения поглощения больших кластеров в диапазоне длин волн 330–380 нм (таблица).

В период с  $12^{30}$  до  $13^{00}$  рост ослабления с максимумом около  $12^{20}$  происходит в фазе с ходом  $W$ , что может быть объяснено достаточно большим поступлением водяного пара в атмосферу при возгонке толстого слоя инея, покрывавшего все предметы и растительность. К сожалению, отсутствие спектральных данных между  $12^{30}$  и  $15^{30}$  не позволило проследить за вариациями ослабления в период подхода  $W$  к максимуму и последующего снижения.



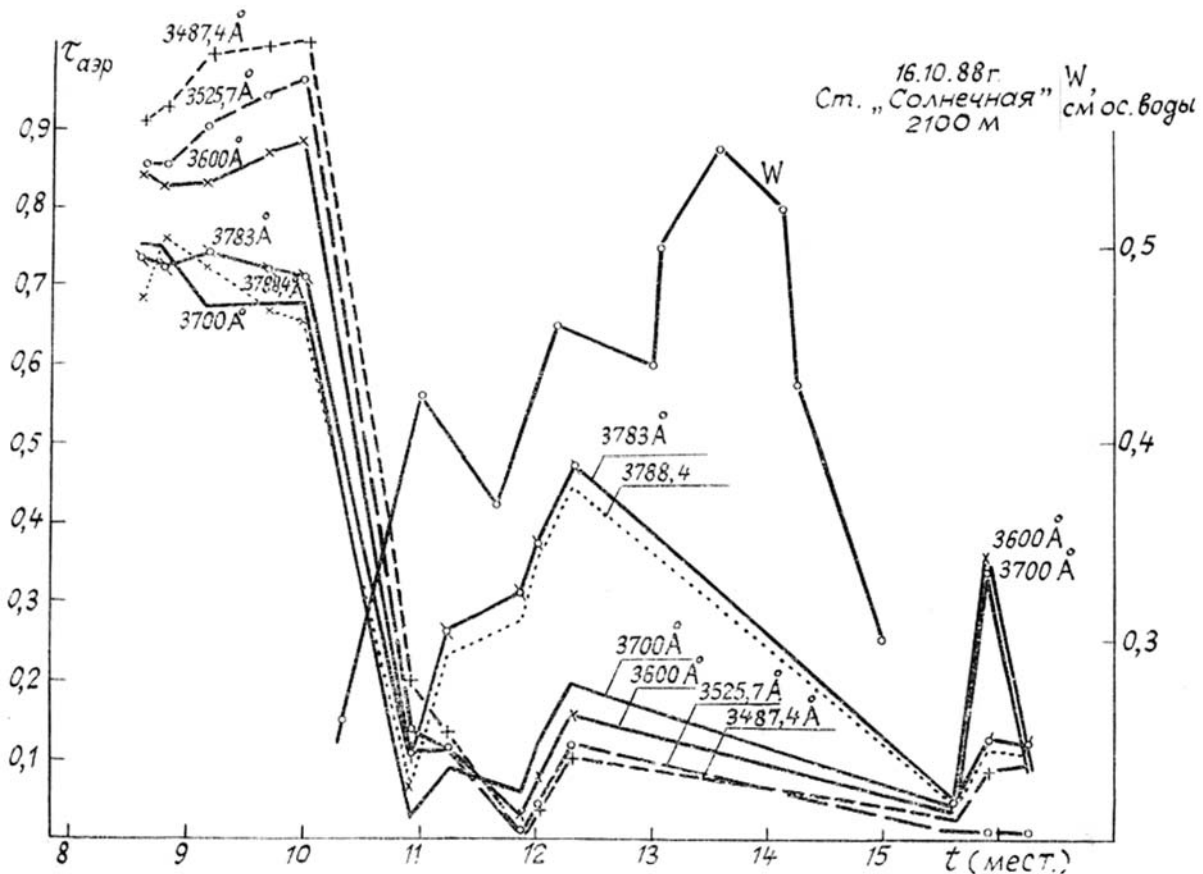


Рис. 4. Дневной ход спектральных остаточных толщин (аэрозольных)  $\tau_a$  и общего содержания водяного пара  $W$ . Наблюдения 16.10.1988. Длины волн в ангстремах (Å).

Проявление аномалий в величинах и дневном ходе ослабления солнечного излучения 16.10.88 г. определенно связывается с особенностями метеоситуации в этот день. При высокой прозрачности в видимой и ИК-областях спектра (высокие интегральные потоки), при отрицательных температурах воздуха в утренние часы поступления дополнительных количеств водяного пара с поверхности обеспечили идеальные условия для развития больших кластеров ранним утром, распада их в предполуденное время, роста массы кластеров с меньшей степенью ассоциации после полудня и появления около 16 ч третьего максимума ослабления, имеющего свои спектральные особенности.

## Выводы

Впервые обнаружено, что воздействие солнечной активности на радиационные поля в тропосфере происходит, главным образом, через процессы перехода части молекул (30% и более) водяного пара из свободного состояния в связанное и обратно в свободное. При этих процессах в существенной степени изменяется их вклад в перенос солнечного излучения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах спектра, а также перенос длинноволнового излучения земной поверхности и атмосферы.

Подтверждается, что: 1) эффекты аномальной прозрачности и аномальной селективности связаны с теми же процессами кластеризации молекул водяного пара; 2) все выводы С.Ф. Родионова о возникновении в условиях высокой прозрачности, достаточной увлажненности и пониженных температур воздуха эффекта аномальной прозрачности справедливы. Единственный штрих, необходимый для уточнения выводов С.Ф. Родионова, — это замена субмикронного аэрозоля (как действующего фактора) на водные кластеры.

1. Schuurmans C. J. E., Oort A. H. // Pure Appl. Geophys. 1969. V. 75. № IV. P. 233–246.
2. Герман Д. Р., Гольдберг Р. А. Солнце, погода и климат. // Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 178.
3. Солнечные данные // Бюллетень. Л.: Наука. 1981. № 7. С. 119.
4. Алексеева Г. А. Исследования спектральной атмосферной экстинкции по электроспектрофотометрическим наблюдениям звезд. Дис. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук, ГАО АН СССР, 1982.
5. Fehsenfeld F. C., Ferguson E. E. // J. Geoph. Res. 1969. V. 74(9). P. 2217–2222.
6. Виноградов П. С., Ларин И. К., Поройкова А. И., Тальрозе В. А. // Тр. Всес. совещания по озону. Москва, ноябрь 1977 г. М.: Гидрометеиздат, 1980. С. 268.
7. Ефимов Н. Н., Красильников Д. Д., Никольский С. И. и др. // Проблемы физики кос-

мических лучей. М.: Наука, 1987. С. 186–199.

8. Горчаков Е. В. // Проблемы физики космических лучей. М.: Наука, 1987. С. 30–50.

9. Stdhli M., Gary D.E., Hurford G.J. // Bull. Amer. Astron. Soc. 1988. V. 20. № 2. P. 678.

10. Еньшин А. В., Творогов С. Д. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 5. С. 456–461.

11. Никольский Г. А., Сафронова М. М., Шульц Э. О. // Распространение оптических волн в атмосфере и адаптивная оптика. Томск, 1988. С. 71–78.

12. Родионов С. Ф. Электрофотометрические исследования атмосферы на Эльбрусе. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 125 с.

13. Гущин Г. П., Виноградова Н. Н. Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 238 с.

14. Розенберг Г. В. // Проблемы атмосферной оптики. Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. С. 21–24.

Ленинградский госуниверситет

Поступила в редакцию  
26 сентября 1989 г.

V.L. Krauklis, G.A. Nikol'skii, M.M. Safronova, E.Yu. Shults. **On The Conditions under Which the Anomalous Extinction of the UV Radiation by Aerosol Can Occur in Clear Atmosphere.**

Combination of the spherical, actinometric and meteorological data obtained during the periods of solar activity (1981–to 1988) is analyzed in order to reveal the component transferring the solar emissions power to the troposphere. It is found experimentally for the first time that water vapor can come from free to bound (clusters) state and back under the action of microwave radiation with the UV radiation and corpuscular stream as the auxiliary factors.

The water vapor transition into bound state causes the decrease of the atmospheric optical depth in the visible and near IR regions and the appearance and strengthening of the cluster absorption bands in the regions 330 to 340, 360 and 380 to 390 nm. The optical depth of the atmosphere due to the cluster absorption can reach 1.0 in the range 330 to 340 nm.

It is confirmed in the paper that the effect of anomalous atmospheric transmission is of the cluster origin and takes place under the conditions described by S.F. Rodionov.