С. И. КРЮЧКОВ

ФИЗИКА ИОНОСФЕРЫ НЕВОЗМУЩЕННОГО ДНЯ*

В статье рассмотрен теоретически вопрос о механизме процессов, обуславливающих определенное электрическое состояние верхних слоев атмосферы.

Теоретическое исследование состояния ионосферы невозмущенного дня заключается в расчете круглосуточного хода вертикальных критических частот для любого дня года на произвольно выбранной широте при условии, что проводящий слой Хивисайда (ионизированные слои) обязан своим существованием действию ультрафиолетовых лучей солнца, когда возмущающим влиянием других факторов (корпускулярного излучения солнца, метеоров и т. д.) можно пренебречь.

Точное решение задачи, даже при этих упрощающих предположениях, весьма затруднительно, приближенное же рассмотрение и решение ее возможно довести до конца на основании следующих достаточно надежных положений.

I. Процессы диссоциации и ионизации газов верхних слоев земной атмосферы нестационарны. Математически это положение выражается интегралом уравнения ионизационно-рекомбинационного процесса в виде

$$n_e = \sqrt{\frac{I_h}{\alpha(r)} \cdot \frac{\frac{\sqrt{I_h \alpha(r)} + n_0 \alpha(r)}{\sqrt{I_h \alpha(r)} - n_0 \alpha(r)} - e^{-2\sqrt{I_h \alpha(r)} \cdot t}}{\frac{\sqrt{I_h \alpha(r)} + n_0 \alpha(r)}{\sqrt{I_h \alpha(r)} - n_0 \alpha(r)} + e^{-2\sqrt{I_h \alpha(r)} \cdot t}}}, \quad (1)$$

где $\alpha(r)$ — коэффициент рекомбинации; n_0 — электронная концентрация к моменту начала промежутка времени t , n_e — значение электронной концентрации к концу этого промежутка времени на той высоте h , для которой ведется расчет, когда I_h показывает число ионизаций в 1 см^3 в 1 сек. на этой же высоте h . Выражение (1) вполне применимо и в случае диссоциационно-рекомбинационных процессов. Идея такого расчета высказана мною впервые в 1934 г. По моей просьбе Н. Н. Крыловым в том же 1934 г. проинтегрировано ионизационно-рекомбинационное уравнение

$$\frac{dn_e}{dt} = -\alpha(r) n_e^2 + I_h \quad (2)$$

и получен его интеграл (1) при этом предположении нестационарности. Интеграл применим там, где образованием отрицательных ионов можно пренебречь, т. е. к слою F_2 , и с некоторыми оговорками к слою F_1 . Для решения задачи по слою E одного этого интеграла уже недостаточно, так как в этом слое роль отрицательных ионов весьма значительная, если не главная.

* Доложено на совещании по изучению ионосферы, созванном по постановлению Академии Наук СССР 24—26 апреля 1939 г. в Москве.

Обозначая через A выражение

$$A = \frac{\frac{\sqrt{I_h a(r)} + n_0 a(r)}{\sqrt{I_h a(r)} - n_0 a(r)} - e^{-2\sqrt{I_h a(r)} \cdot t}}{\frac{\sqrt{I_h a(r)} + n_0 a(r)}{\sqrt{I_h a(r)} - n_0 a(r)} + e^{-2\sqrt{I_h a(r)} \cdot t}}, \quad (3)$$

выражение (1) можно сокращенно переписать следующим образом:

$$n_e = \sqrt{\frac{I_h}{a(r)}} \cdot A.$$

Следует различать три случая: 1) $A < 1$ — электронная концентрация растет (утренние часы), 2) $A = 1$ — электронная концентрация постоянна (наблюдается в разное время года в разные часы, начиная с предполуденных и кончая послеполуденными часами, и длится в разное время года на разных широтах различные промежутки времени), 3) $A > 1$ — электронная концентрация падает (имеет место в послеполуденные часы, хотя может наблюдаться и раньше, особенно в областях, близких к экватору).

Назовем случай первый — ненасыщенным, второй — насыщенным и третий — пересыщенным состояниями по ионизации (диссоциации).

II. Поглощение энергии ультрафиолетовой радиации солнца газами земной атмосферы избирательно. Обоснования этого положения можно найти в экспериментальных и теоретических работах ряда авторов по поглощению разными газами ультрафиолетовых лучей (1928—1933 гг.). Но для числовых расчетов необходимо знать в каждом отдельном случае ширину полосы поглощения рассматриваемого газа и контур коэффициента атомного поглощения газа внутри этой полосы. Кроме теоретических исследований Крамерса, я использовал весьма ценные указания по разбираемому вопросу акад. А. Н. Теренина, любезно сообщенные мне в личной беседе, и экспериментальные работы по поглощению O_2 в шумановском ультрафиолете. Принцип избирательного поглощения обсуждался мною еще с Д. А. Рожанским (1928—1936 гг.) и с В. М. Чулановским (1937—1939 гг.). Величина I_h вычислялась мною по формулам Планка-Педерсена, видоизмененным мною для случая неперпендикулярного падения солнечных лучей с учетом кривизны Земли и избирательности поглощения газа, для которого велись расчеты.

Эти расчеты первого приближения велись при следующих предположениях, по моему мнению, достаточно удовлетворительно характеризующих условия невозмущенного дня: 1) эффективная температура солнца равна $6000^\circ K$, 2) распределение энергии излучения солнца — планковское, 3) диссоциация и ионизация газов земной атмосферы вызываются лишь энергией ультрафиолетовых лучей солнца, 4) температура в слое F_2 колеблется в пределах $220—500^\circ K$, 5) солнечная постоянная на границе земной атмосферы была принята равной $S_{00} = 1,35 \cdot 10^6$ эрг/см²сек ($\approx 1,94$ кал/см²мин) (в возмущенный день, по моему мнению, температура в слое F_2 может подниматься до $1000^\circ K$, возможно даже и несколько выше).

Мои исследования и расчеты показали, что O_2 полностью диссоциирует на атомы под действием ультрафиолетовых лучей солнца (1928—1929 гг.). Исследования 1934—1935 гг. привели меня к выводу, что нижняя граница полной диссоциации O_2 на атомы располагается на высотах 140—190 км, ниже — летним днем в низких широтах, и выше — зимою в более высоких широтах.

Оказалось далее, что летом под действием ультрафиолетовых лучей солнца сразу после его восхода (и даже несколько раньше) ионизируется O_2 , а далее O_1 начинает доминировать (по причине диссоциации O_2), так что в основном в летние месяцы слой F_2 обязан своим существованием ионизации O_1 . Незадолго перед закатом солнца опять начинает ионизироваться O_2 (возникающий за счет рекомбинации атомов O_1), и эта ионизация в более

высоких широтах летом может продолжаться всю ночь за счет лучей, идущих з-под горизонта, поскольку солнце на этих широтах весьма мало успевает спуститься ниже горизонта за очень короткую летнюю ночь. Слой F_1 летом — продукт ионизации O_2 в очень тонком слое (по моему мнению). Весной (март в меньшей степени апрель) и осенью (сентябрь) слой F_2 существует за счет ионизации O_2 и O_1 .

Зимой слой F_2 является слоем ионизированного O_2 (октябрь—февраль). Высоты максимальной электронной концентрации, а следовательно и действительные высоты отражения критических вертикальных частот по моим вычислениям располагаются так: 1) летом на 250—270 км днем, на 220 км утром, вечером и ночью и на ≈ 170 км перед восходом солнца, 2) весной (март в меньшей степени апрель), осенью (сентябрь) в среднем на 220 км и 3) зимой на 160—170 км днем (для широт больших 30°) и на 170—280 км ночью.

Нижняя граница полной диссоциации O_2 на атомы находится в достаточно удовлетворительном согласии с данными, полученными И. А. Хвостиковым на основании изучения явления ночного свечения неба. По проверенному методу Смиса (N. Smith) действительные высоты отражения вертикальных критических частот можно в первом приближении пересчитать на кажущиеся высоты отражения по формуле

$$h_{\text{каз}} = [(h_{\text{действ}} - 100)2 + 100] \text{ км}, \quad (4)$$

что даст: 1) летом 400—440 км днем, 340 км утром, вечером, ночью и ок. 240 км перед восходом солнца; 2) весной и осенью в среднем ок. 340 км; 3) зимой 220—240 км днем и 240—460 км ночью.

Действительные высоты я нашел теоретическим путем в 1934—1936 гг. в то время, как Смис опубликовал свой метод пересчета в 1938 г. Таким образом, мои теоретические результаты получены раньше и находятся в достаточно удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

Мною и под моим руководством тов. А. М. Миримовым были выполнены теоретические расчеты круглосуточного хода максимальных электронных концентраций для всех месяцев года для $39^\circ N$ (Вашингтонская ионосферная станция), которые, как известно, уже легко пересчитать далее на вертикальные критические частоты. Расчеты велись по каждому отдельному месяцу.

Совпадение результатов расчета с экспериментальными данными оказывается в основном удовлетворительным, а по декабрю хорошим. Первый подобный этому расчет был выполнен мною в начале 1936 г. для 18—19 июня для $53^\circ N$ (день полного солнечного затмения); результаты этого расчета оказались в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными, полученными Тетельбаумом в Киеве ($50^\circ N$) и Кессенихом в Томске ($56^\circ 30' N$). В период 10—20 июня 1936 г. аналогичные расчеты велись и для ряда других широт, например для Хуанкайо и для других ионосферных станций, и дали также достаточно удовлетворительные, а в некоторых случаях и хорошие результаты. Таким образом, было сверено с экспериментом достаточно большое число отдельных часов. Ориентировочно (детальное исследование еще продолжается) приблизительно в 20% всех случаев расхождение теории и эксперимента не превосходит $\pm 5\%$; в 30% случаев $\pm 10\%$; в 30% случаев $\pm (15-20)\%$ и в 20% случаев $> \pm 20\%$.

По моему мнению, в первом приближении задача невозмущенного дня в основном решена удовлетворительно для слоя F_2 и ночного слоя F (когда нет возмущений). Расчеты для слоя E дают высоту (действительную) — для экватора 100 км, для $60^\circ N$ 110—120 км и для $80^\circ N$ 120—130 км.

Картина ионизации в слое E представляется весьма сложной. Ясно одно: в этом слое в большом количестве образуются отрицательные ионы O_2 весьма непрочные, распадающиеся вновь под действием энергии даже инфракрасных лучей солнца, отчего слой E весьма быстро появляется после восхода солнца и также быстро исчезает перед его заходом.

Решение проблемы невозмущенного дня дает: 1) расчет суточного хода вертикальных критических частот для любого времени года, для всего диапазона широт от $62^{\circ}N$ до $62^{\circ}S$ (ионосфера более высоких широт, повидимому, испытывает все время неправильные и неперiodические возмущения и потому пока не рассматривается), 2) расчет вертикальных разрезов ионосферы (изменения электронной концентрации в функции высоты), 3) расчет рабочих частот связи на заданные расстояния.

Нахождение рабочих волн связи на заданные расстояния возможно и осуществимо несколькими способами. Сперва П. О. Педерсен дал метод расчета траекторий радиоволн связи. Смирн и другие исследователи дали в свою очередь методы нахождения рабочих волн связи на заданные расстояния.

Что касается природы возмущений ионосферы, то несомненно, что часть их вызывается колебаниями интенсивности излучения в ультрафиолете солнца (я не имею в виду эффекта Деллинджера). Мои расчеты показывают, что изменение температуры солнца всего на $\pm 0,5\%$ вызвали бы колебания в величине ионизирующей и диссоциирующей энергии излучения солнца в ультрафиолете на $\pm 15\%$. Большая, если не вся остальная часть возмущений вызывается вторжением в земную атмосферу корпускулярных потоков, всего вероятнее идущих от солнца. Спорадические слои E могут вызываться как корпускулярными потоками, идущими от солнца, так и потоками метеорной пыли. К сожалению, вопрос о воздействии на ионосферу потоков метеорной пыли, кажется, совершенно не разработан, а вопрос о роли корпускулярных потоков солнца исследуется слишком медленно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рожа́нский Д. А., Физич. основания теории распростран. коротких волн, ГТТИ, 1934.
2. Pedersen P. O., The propagation of the radio-waves along the surface of the Earth and in the atmosphere, Copenhagen, 1927.
3. Хвостиков И. А., Ночное свечение неба, изд. Акад. Наук СССР, 1937.
4. Хвостиков И. А., Отч. по физике верхних слоев земн. атм., Усп. физ. н., I—II, 1938.
5. Тетельбаум С. И., Наблюдения ионосферы в июне—июле 1936 г. в Киеве, $50^{\circ}27'N$ и $30^{\circ}30'E$, Журн. техн. физ., т. VII, вып. 7, 1937.
6. Кессених В. Н., Булатов Н. Д., Барвальд Г. М., Денисов В. Г., Журн. техн. физ., т. VII, вып. 12, 1937.
7. Крючков С. И., Условия распространения коротких электромагнитных волн в земной атмосфере, дипломная защита (не опубликована), 1929.
8. Крючков С. И., Условия распространения коротких электромагнитных волн в земной атмосфере, Журн. прикл. физ., т. VII, вып. 2, 1930.
9. Крючков С. И., О структуре проводящего слоя Хивисайда, Научно-техн. сборн. Электро-техн. инст. связи, вып. VIII, 1935.
10. Крючков С. И., О причинах быстрого исчезания после восхода солнца и такого же быстрого возникновения при восходе солнца слоя E , Труды I Всес. конф. по изуч. стратосферы, изд. Акад. Наук СССР, 1935.
11. Крючков С. И., Геофизич. сборн. по земному магнетизму и электричеству, вып. III, 1937.
12. Proc. Rad. Eng., за период 1934—1938 г. включительно и январь—февраль 1939 г.
13. Terr. Mang., за 1938 г. и за более ранние годы.
14. Бонгеффер и Гартек, Основы фотохимии, ГТТИ, 1935.

S. KRIUCKOV. THE PHYSICS OF THE IONOSPHERE OF UNDISTURBED DAY.

SUMMARY

The author considers theoretically the question concerning the mechanism of processes causing a definite electric condition of the upper layers of the atmosphere. With this purpose he made calculations of the twenty four hours of the day variations of vertical critical frequencies for any day of the year on the arbitrarily chosen latitude. Although calculations were done at simplifying assumptions, the obtained results agree in general with the experimental data.