

Надежда Бозрова
О некоторых
параметрах ионосферы

11 XI/1967

WARSZAWA 1967

Prace Zakładu Teorii Łączności

Praca Nr 57



Na prawach rękopisu
Do użytku wewnętrznego

Zakład Teorii Łączności IPPT-PAN
Nakład 200 egz. A.w. 0.6, A.d.1.
Druk ukończono w sierpniu 1967 r

Warszawska Drukarnia Naukowa
Warszawa, ul. Śniadeckich 8
Zam. 690/0/67

О НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРАХ ИОНОСФЕРЫ

Надежда Боброва

С тех пор, как Кеннели и Хевисайд в 1902 г. предположили возможность отражения радиоволн от ионосферы, теория распространения волн в ионосфере сделала огромные успехи. При изучении разнообразных эффектов, возникающих при распространении радиоволн в ионосфере, необходимо знать её параметры и их взаимосвязь между собой. Наши сведения о параметрах ионосферы непрерывно расширяются и уточняются в связи со всё новыми экспериментальными и теоретическими исследованиями. В настоящее время параметры ионосферы определяются как методом радиозондирования с поверхности Земли, так и с помощью геофизических ракет, а также ионосферных станций, установленных на искусственных спутниках Земли.

В последние годы в литературе появился ряд работ, в которых подводятся итоги успехов, достигнутых в изучении ионосферы. К их числу следует отнести увлекательный обзор об исследованиях внутри ионосферы Р. Бурдо /1/, справочник по околоземному космическому пространству под редакцией Ф. С. Джонсона /2/, а также издаваемую АН СССР серию "Геофизика" /3/.

Целью настоящей работы является анализ некоторых параметров ионосферы таких, как её ионный состав, температура, концентрация электронов и их эффективная частота соударений. Такой анализ производится на основе периодической научной литературы по данному вопросу.

Ионосферу определяют как часть верхней атмосферы, содержащую значительное число заряженных частиц, обладающих тепловой энергией. Ионосферу принято подразделять на следующие области: D, E, F и верхнюю ионосферу. Каждая из вышеупомянутых областей обладает рядом особенностей. В формировании этих особенностей огромную роль играют излучение Солнца, механизмы образования и потерь заряженных частиц, а также гравитационные и электромагнитные силы.

Д-область

Д-область (на высотах от 50 до 85км) является самой нижней областью ионосферы, содержащей значительное количество электронов и обладающей высокой частотой столкновений между электронами и нейтральными частицами из-за сравнительно большой плотности ионосферы на этих высотах. В этих столкновениях безвозвратно теряется энергия, полученная ранее электронами, следовательно, в Д-области имеет место поглощение радиоволн, в связи с этим, изучение этой области приобретает важное значение для радиосвязи. Кривая (I) на рис.1 показывает дневной "усредненный профиль" концентрации электронов N_e в нормальной дневной Д-области, т. е. когда ограничиваются географическими умеренными широтами и отсутствием вспышек на Солнце. Максимальная электронная концентрация наблюдается вблизи 80км и достигает величины $10^3 \frac{эл}{см^3}$.

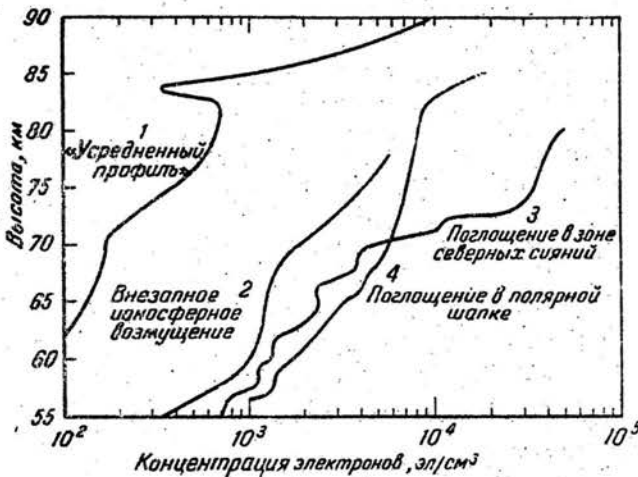


Рис. 1

В работе Г. С. Иванова-Холодного [4] дана попытка описания механизмов ионизации нижней ионосферы. Ионизация в Д-области, согласно общепринятой точке зрения, происходит под действием космических лучей, а также рентгеновского (с длиной волны 2-8Å) и лаймановского L_{α} (с длиной волны 1216Å) излучений. Причём относитель-

ная роль двух последних источников в формировании Д-области зависит от уровня солнечной активности.

Основной причиной потерь электронов в Д-слое является процесс диссоциативной рекомбинации электронов с положительными ионами. Для оценки этих электронных потерь необходимо знать различные для разных видов ионов значения скорости рекомбинации /5/.

В Д-области наблюдаются явления, при которых концентрация электронов повышается на два порядка и при которых имеет место сильное поглощение радиоволн. Существуют три типа электромагнитного поглощения.

Первый из них называется внезапным ионосферным возмущением и порождается сильным рентгеновским излучением солнечных вспышек (кривая (2) на рис. I).

Второй тип поглощения связан с активными полярными сияниями и магнитными возмущениями и вызван корпускулярными потоками (кривая (3) на рис. I).

На широтах выше зоны полярных сияний наблюдается третий тип поглощения, называемый поглощением в полярной шапке и объясняемый проникновением энергетических частиц в область Д. (кривая (4) на рис. I).

Е-область

Область ионосферы, простирающаяся от 85 км до 140 км, принято называть Е-областью. На рис. 2 . представлены типичные профили концентрации электронов в ионосфере для дневных и ночных условий. Днём концентрация электронов в Е-области достигает порядка $10^6 \frac{21}{\text{см}^3}$, а ночью уменьшается примерно в 100 раз. Характерной особенностью ночных профилей N_e является наличие чётко выраженного максимума на высотах 100-120 км, над которым начинается резкое уменьшение N_e .

Причины образования ночного слоя Е и провала над ним ещё не ясны. В настоящее время в литературе обсуждается вопрос о существовании ночного источника ионизации на высотах 100-120 км /6/. В работе Т. В. Казачевской и Г. С. Иванова-Холодного /7/ считает-

ся, что ночной слой E поддерживается медленно ослабляющимся после захода Солнца корпускулярным источником ионизации, мощность которого в период низкой активности Солнца уменьшается в десятки и сотни раз.

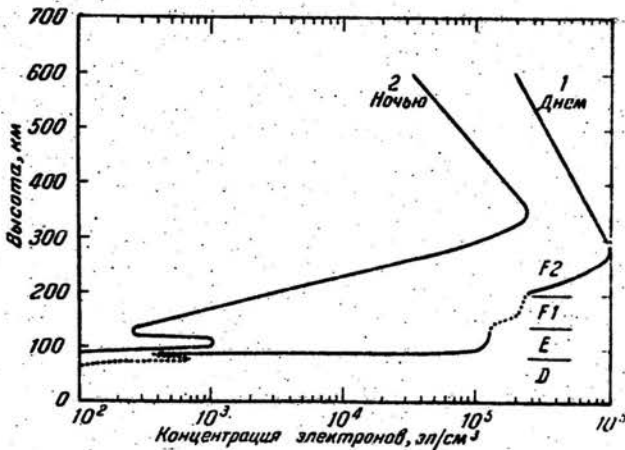


Рис. 2.

Часто в E-слое наблюдается аномалия, называемая спорадическим E_s слоем. Этот слой имеет толщину приблизительно 0,5 км, а концентрация электронов в нём обычно в 2 раза больше концентрации электронов выше и ниже слоя. Образование спорадического E_s слоя представляет собой одно из загадочных явлений в ионосфере. Теорий об образовании E_s очень много. Так например, М. Н. Фаткулин /8/ даёт попытку связать происхождение наиболее характерных типов E_s в ионосфере на средних и низких широтах с S_z-токами в области E. В /9/ показано, что экваториальный слой E_s связан с экваториальной электроструей. Г. С. Иванов-Холодный и В. И. Лазарев /10/ предлагают механизм образования узких слоёв E_s потоками электронов высокой энергии, захваченными магнитным полем Земли.

F -область

Область высот от 140 км до 600 км принято называть F -областью.

В F-области различают ещё два слоя F_1 и F_2 . Слой F_1 лежит между высотами от 140км до 200км и наблюдается в дневное время, а ночью полностью исчезает (см. рис.2). Типичное значение электронной концентрации для полудня составляет $2,5 \cdot 10^5$ эл/см³ в период минимума и $4,0 \cdot 10^5$ эл/см³ в период максимума солнечной активности. Выше 200км лежит слой F_2 . Эта область характеризуется множеством аномалий и является наиболее трудной для описания. На рис.2 показан также профиль электронной концентрации F_2 слоя. Поведение $h_m F_2$ -высоты максимума электронной концентрации F_2 слоя очень запутано, $h_m F_2$ зависит от местного времени, широты и уровня солнечной активности. На средних широтах высота максимума электронной концентрации изменяется от 200км до 400км.

А. И. Лихачёв /11/ на основе результатов обработки материалов исследований по данным 70ионосферных станций северного полушария пришел к выводу, что состояние ионизации слоя F_2 контролируется волновым излучением Солнца в широкой полосе широт от +15° до Полярного круга. В экваториальной зоне, где годовое изменение поступления волновой радиации мало, связь $f_o F_{2max}$ - критической частоты слоя F_2 с волновой солнечной энергией ослабевает, здесь большее влияние на вариации $f_o F_{2max}$, а следовательно, и на вариации N_{max} - максимальной электронной концентрации слоя F_2 ,^x в годовом ходе оказывают электродинамические процессы и магнитное поле Земли /12/.

За ионизацию F_2 -области ответственна главным образом солнечная радиация в диапазоне длин волн от 200 до 900Å. В результате фотоионизации образуются ионы атомарного кислорода O^+ и электроны. Среди механизмов электронных потерь в F-слое важную роль играет процесс диссоциативной рекомбинации. Как известно, прямая рекомбинация электронов и атомарных ионов протекает сравнительно медленно и не может объяснить скорости электронных потерь даже в верхней части F_2 области. В тоже время известно, что скорость диссоциа-

Как известно, критическая частота f_o определяется из соотношен.

$$(2\pi f_o)^2 = \frac{4\pi e^2}{m} N_{max} = 3,18 \cdot 10^9 N_{max}$$

где e, m - заряд и масса электрона, соответственно.

ной рекомбинации молекулярных ионов на несколько порядков больше скорости рекомбинации атомарных ионов с электронами, поэтому присутствие молекулярных ионов должно оказывать влияние на скорость электронных потерь в F_2 -слое /13/. В настоящее время считается, что причиной электронных потерь в F -области является диссоциативная рекомбинация, представляющая из себя двухступенчатый процесс. Этот процесс состоит из 1) ионно-атомного обмена между молекулами N_2 и ионами O^+ , 2) рекомбинации образовавшихся ионов NO^+ с электронами. Медленность этого двухступенчатого процесса можно частично объяснить прочное сохранение ионизации в ночное время.

С уменьшением плотности нейтральных составляющих уменьшается роль фотохимических процессов и начинают преобладать процессы переноса зарядов, которые вызывают уменьшение концентрации электронов с высотой.

Ионный состав ионосферы.

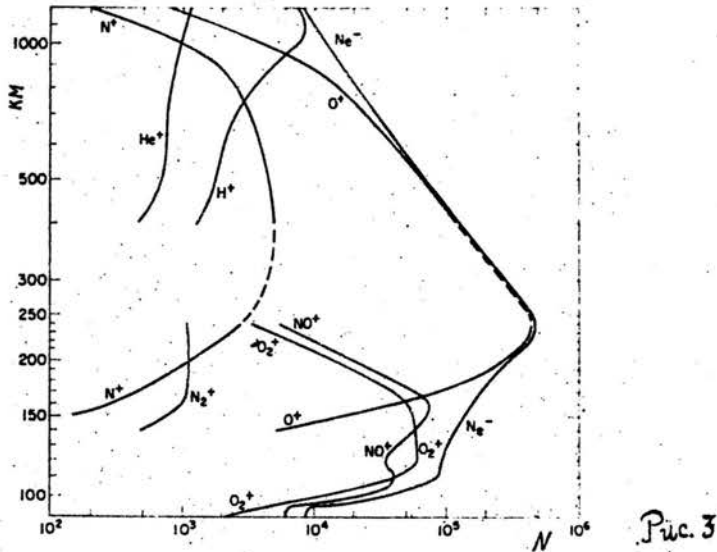
Для понимания механизмов образования и потерь электронов необходимо знать ионный состав ионосферы. Как следует из работы /14/, в течение года минимальной солнечной активности имеет место следующие механизмы образования и потерь ионов.

В области (65-83)км концентрация положительных ионов азота N^+ равна в среднем 10^8 ионов/см³. Области (83-88)км и (88-93)км ионизируются посредством (2-3Å) X-излучением и 33,7Å излучения с образованием ионов O_2^+ и N_2^+ с последующим ионно-атомным обменом: $N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + NO$, приводящим к тому, что основной ионной разновидностью на этих высотах является NO^+ .

Область (93-115)км преимущественно ионизируется EUV излучением с образованием O_2^+ и излучением 40-75Å с образованием N_2^+ . Причём ионы N_2^+ убывает из-за реакций ионно-атомного обмена типа $N_2^+ + O \rightarrow NO^+ + N$ или $N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + N_2$, приводящих к области, где NO^+ и O_2^+ одинаково важны.

На рис.3 приведён график высотного распределения ионного состава в

дневное время по данным при минимальной солнечной активности в области высот от 90км до 1200км /15/.



Из-за отсутствия надёжных данных в пределах высот от 240км до 400км на этом рисунке, к сожалению, не удастся проследить область исчезновения молекулярных ионов. Результаты измерений показывают, что в дневное время переход от ионов O^+ к более лёгким He^+ и H^+ возникает в районе 300км. В ночное же время в умеренных широтах (48° - 73°) такой переход имеет место приблизительно на уровне 550км летом и 500км зимой /16/.

Столкновения в ионосфере

Наличие электронов и ионов в ионосфере делает её электропроводной. На величину проводимости ионосферы существенным образом влияет частота соударений электронов с ионами ν_{ei} , частота соударений электронов с нейтральными частицами ν_{en} , а также частота соударений ионов с нейтральными частицами ν_{in} .

Области Д и Е ионосферы характеризуются высокой частотой столкновений электронов с нейтральными частицами. Как следует из данных измерений /17/, частота столкновений электронов с нейтральными частицами в Д-области постепенно уменьшается с увеличением высоты от величины порядка $3,4 \cdot 10^7$ сек⁻¹ на высоте 50 км до величины порядка $3,5 \cdot 10^5$ сек⁻¹ на высоте 80 км. На высоте 105 км частота столкновений электронов с нейтральными частицами уменьшается уже до величины $(1,2 \pm 0,5) \cdot 10^4$ сек⁻¹. Измерения показывают также, что на высотах от 60 до 80 км имеется некоторая сезонная зависимость, а именно, летние и осенние величины v_{en} примерно в 1,6 раза больше зимних и весенних величин частот соударений электронов с нейтральными частицами.

В /18/ подтверждается высказанная ранее В. Л. Гинзбургом /19/ точка зрения, что в нижней области необходимо учитывать как соударения электронов с нейтральными частицами, так и соударения электронов с положительно заряженными ионами, несмотря на то, что концентрация ионов значительно меньше концентрации нейтральных частиц на этих высотах. Такой учет нужен ввиду того, что сечение рассеяния σ электрона положительным ионом в миллион раз больше, чем сечение рассеяния электрона нейтральной частицей.

Частота столкновений зависит от электронной температуры T_e . Эта зависимость выражается следующим образом:

$$v_{en} = 8,3 \cdot 10^5 N_n T_e^{1/2} \text{ сек}^{-1}$$

для столкновений электронов с нейтральными частицами, где N_n — концентрация нейтральных частиц.

$$v_{ei} = \frac{55 N_i}{T_e^{3/2}} \ln \left(\frac{220 T_e}{N_i^{1/2}} \right) \text{ сек}^{-1}$$

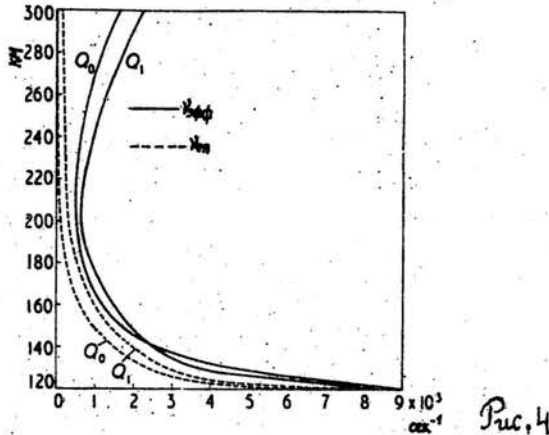
для столкновений электронов с положительными ионами.

Эффективная частота столкновений электронов в нижней F-области является суммой указанных выше частот и выражается следующим способом:

$$v_{эфф} = 8,3 \cdot 10^5 N_n T_e^{1/2} + \frac{55 N_i}{T_e^{3/2}} \ln \left(\frac{220 T_e}{N_i^{1/2}} \right) \text{ сек}^{-1}$$

Эффективная частота столкновений остается всегда больше частоты столкновений электронов с нейтральными частицами на высотах, превышающих 120 км. На высоте 200 км $v_{эфф}$ больше v_{en} в 2 раза.

Изменение эффективной частоты столкновений электронов $\nu_{эф}$ и частоты столкновений электронов с нейтральными частицами $\nu_{н}$ в зависимости от высоты приведено на рис.4.



Как видно из этого рисунка, частота столкновений электронов с нейтральными частицами $\nu_{н}$, обозначенная штрихованной линией, резко падает с увеличением высоты.

Через Q_0 и Q_1 на этом рисунке обозначено количество поступающей в ионосферу энергии за единицу времени, причём $Q_0 = 1 \cdot 10^2$ эв/см² сек, а $Q_1 = 1 \cdot 10^4$ эв/см² сек. Увеличение поступающего в ионосферу количества энергии увеличивает эффективную частоту столкновений электронов.

Выше 200км уже преобладают столкновения электронов с ионами, частота которых $\nu_{и}$ контролируется электронной и ионной плотностями, а также электронной температурой. Отметим, что на высотах порядка 600-700км эффективная частота столкновений электронов составляет всего лишь $(1+3)10^2$ сек⁻¹.

Температура ионосферы

Термическое поведение ионосферы является в настоящее время предметом многих теоретических работ и разнообразных экспериментов.

Главным источником нагрева верхней атмосферы является солнечное ультрафиолетовое излучение, хотя не следует пренебрегать фактом, что существуют и другие источники, как например, диссипация гидромагнитных волн, электрические поля, быстрые частицы и др.

Экспериментальные наблюдения показывают, что на высотах, превышающих 300 км, электронная температура T_e может превышать ионную температуру T_i . В работе /20/ найдено, что отношение электронной температуры к ионной температуре T_e/T_i достигает максимума от 2 до 2,8 в областях от 360 км до 400 км, уменьшаясь затем до величины меньшей, чем 1,5, на высотах, больших 650 км.

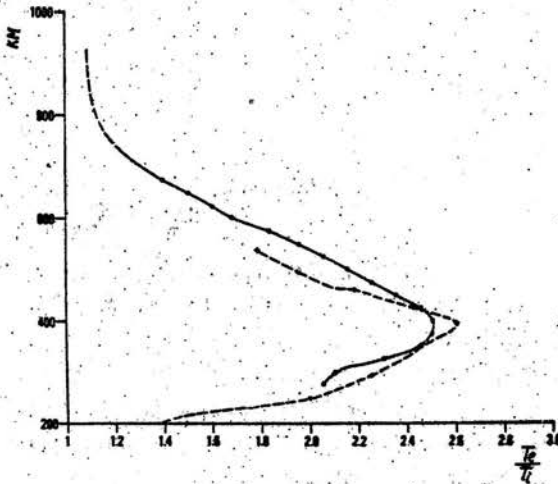


Рис.5

Сплошная кривая на рис.5 показывает профиль отношения электронной температуры к ионной температуре T_e/T_i в зависимости от высоты для периода времени близкого к полудню. Пунктирная кривая показывает профиль этого же отношения, полученного при помощи метода спектральных измерений рассеянного сигнала /21/.

Наблюдения показывают, что и ночью температура электронов немного больше температуры ионов и составляет примерно $T_e = 1,3T_i$. Это указывает на существование ночного источника тепла, интенсивность которого может составлять лишь небольшую долю от интенсив-

ности ультрафиолетового излучения.

Из многочисленных наблюдений следует также ясно выраженный суточный ход электронной температуры /22/. На рис.6 представлена зависимость электронной температуры от местного времени для высот в районе 300км.

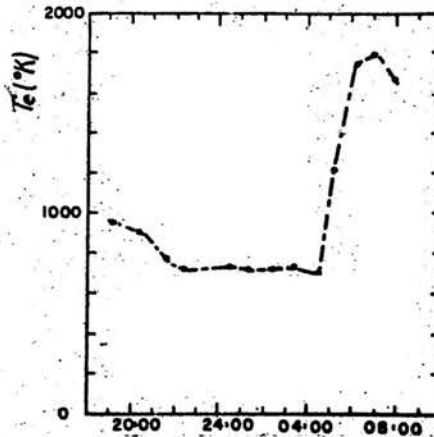


Рис.6

Электронная температура рано утром необычно высока. Этот факт интерпретируется на основании следующей зависимости /23/:

$$T_e - T_i = \frac{AQ}{N_e^2} T_e^{3/2}$$

где Q - приток тепла к электронам, выраженный в эв/см² сек, A -константа ($A=2,1 \cdot 10^6$)

В области F приток тепла к электронному газу сразу же после восхода Солнца нарастает, а так как в ранние утренние часы электронная концентрация N_e ещё сравнительно низка, то число электронов, способных отнять эту энергию мало, и электронная температура резко возрастает. Предполагается, что всё поступающее тепло идёт к электронному газу, прямым нагреванием нейтральных частиц и ионов пренебрегается и что ионы в дальнейшем "отсасывают" энергию от электронов /24/.

Нагревание электронного газа является результатом тепла фотоэлектронов, обладающих значительной энергией, часть которой они

передают окружающим электронам.

Согласно общепринятой гипотезе, температура ионов на высотах меньших 500км близка к температуре нейтрального газа. С увеличением высоты в верхней части слоя F соударения ионов с нейтральными частицами становятся редкими и на достаточно больших высотах теплообмен между электронами и ионами превалирует над теплообменом между ионами и нейтральными частицами.

На высотах больших 800км имеется тенденция к выравниванию ионной и электронной температур.

Важной особенностью как электронной, так и ионной температур, является их широтная зависимость/25/.

Проводимые за последнее время исследования по термическому поведению ионосферы дадут множество интересного материала, расшифрование которого внесет неоценимый вклад в понимание процессов, происходящих в ионосфере.

Литература

- 1 Р. Бурдо, Исследования внутри ионосферы, УФН, 87, 4, 655, /1965/
- 2 Околосземное космическое пространство под редакцией Ф. С. Джонсона, Изд-во "Мир", Москва 1966.
- 3 Итоги науки, серия "Геофизика", Москва 1965.
- 4 Г. С. Иванов-Холодный, О механизме ионизации нижней ионосферы, Геомагн. и аэрономия, 5, 4, 705, /1965/.
- 5 Г. Нестеров, Эффективный коэффициент рекомбинации в нижней ионосфере, Геомагн. и аэрономия, 5, 5, 835, /1965/.
- 6 G. S. Ivanov-Kholodny, Maintenance of night ionospheric and corpuscular fluxes in the upper atmosphere, Space Research V Symposium COSPAR, Amsterdam, 19, /1965/.
- 7 Т. В. Казачевская и Г. С. Иванов-Холодный, Разветвленные данные о поведении электронной концентрации в ионосфере на высотах 100-300км, Геомагн. и аэрономия, 6, 1, 27, /1966/.
- 8 М. А. Баткулин, О связи E_s на средних и низких широтах с электродинамическими условиями в ионосфере, Геомагн. и аэрономия, 5, 3, 435, /1965/.
- 9 Cohen R., Bowles K. L., The association of plane wave electron density irregularities with the equatorial electrojet, J. Geophys. Res. 68, 2503-2525, /1963/.
- 10 Г. С. Иванов-Холодный и В. И. Лазарев, Об одном из возможных механизмов образования узких спорадических слоев ионосферы, Геомагн. и аэрономия, 6, 2, 297, /1966/.
- 11 А. И. Лихачев, Зависимость полуденных критических частот слоя F_2 от поступления волновой солнечной энергии в атмосферу Земли, Геомагн. и аэрономия, 5, 2, 303, /1965/.
- 12 R. G. Rastogi and G. Rajaram, Abnormal behaviour of $f F_2$ at Huacago in magnetically active periods of IGY-IGC, J. Atmosph. Terr. Phys. 27, 1097-1103, /1965/.
- 13 В. М. Поляков и Т. Б. Шукина, О кинетике ионизационно-рекомбинационных процессов в слое F_2 ионосферы, Геомагн. и аэрономия, 6, 5, 858, /1966/.

- 14 R. E. Bourdeau, A. C. Aikin, I. L. Donley. Lower ionosphere at solar minimum, *J. Geophys. Res.* 71, 3, 727, /1966/.
- 15 Charles Y. Johnson, Ionospheric Composition and Density from 90 to 1200 kilometers at Solar Minimum, *J. Geophys. Res.* 71, 1, 330, /1966/.
- 16 Theodore K. Watt, Ion distribution and temperature in the topside ionosphere, obtained from the Alouette Satellite, *J. Geophys. Res.* 70, 23, 5849, /1965/.
- 17 E. V. Thrane and W. R. Piggott, The collision frequency in the E and D regions of the ionosphere, *J. Atmosph. Terr. Phys.* 28, 8, 721, /1966/.
- 18 R. N. Singh, The effective electron collision frequency in the lower F region of the ionosphere, *Proc. Phys. Soc.*, 87, part 2, 556, 425-428, /1966/.
- 19 В. Л. Гинзбург, Распространение электромагнитных волн в плазме Госиздат физ-мат. лит. Москва 1960.
- 20 L. A. Maynard and E. D. Ducharme, A new technique for the measurement of the electron/ion temperature ratio at high altitudes, *Can. J. Phys.* 43, 2088-2092, /1965/.
- 21 Evans, I. V. and M. Loewenthal, Ionospheric backscatter observations, *Planetary Space Sci.*, 12, 915-944, /1964/.
- 22 H. C. Carlison, Jr., Ionospheric Heating by Magnetic Conjugate point Photoelectrons, *J. Geophys. Res.* 71, 195-199, /1966/.
- 23 Hanson W. B., Johnson F. S., Electron temperatures in the ionosphere, *Mémoires Soc. Roy. Sci., Liège*, 4, 390-424, /1961/.
- 24 A. V. da Rosa, The theoretical time-dependent thermal behaviour of the ionospheric electron gas, *J. Geophys. Res.* 71, 17, 4107-4119, /1966/.
- 25 W. C. Knudsen and G. W. Sharp, Ion temperature profile in the topside ionosphere, *J. Geophys. Res.* 71, 17, 4099-4106, /1966/.