

СОЛНЕЧНО-ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ ВОДОРОДА ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

Боговский В. К., Григоренко Е. И., Таран В. И.

Институт ионосферы НАН и МОНУ, Харьков

С помощью радара некогерентного рассеяния в Харькове проведены исследования солнечно-циклических закономерностей в поведении концентрации ионов водорода $n(\text{H}^+)$ во внешней ионосфере, высоты перехода от ионосферы к протоносфере, теплового режима нейтральной атмосферы. Установлено, что характер высотного распределения $n(\text{H}^+)$ дает дополнительную информацию об изменении в цикле солнечной активности (СА) взаимодействия ионосферы с лежащей выше плазмосферой, а также магнитно-сопряженных ионосфер через плазмосферу.

1 ВВЕДЕНИЕ

Поведение ионов водорода служит чувствительным датчиком состояния внешней ионосферы и «космической погоды», возмущения которых воздействуют на технологическую деятельность человека и на «здоровье» всей биосферы Земли. Исследования морфологии и динамики легких ионов во внешней ионосфере осуществляются с помощью современных средств наземного (радары некогерентного рассеяния — РНР) и космического (спутники) базирования по международным программам координированных наблюдений. Такой программой является POLITE (Plasmaspheric Observations of Light Ions in the Topside and Exosphere), которая выполняется в рамках исследовательского проекта NSF CEDAR (Coupling, Energetics and Dynamics of Atmospheric Regions). Результаты наблюдений используются для изучения солнечно-земных связей, а также для решения прикладных задач. К ним относятся уточнение глобальных справочных моделей ионосферы, прогнозирование состояния «космической погоды» и условий распространения радиоволн, калибровка данных спутников, которые проводят исследования магнитосферы Земли и т. п. Исследования внешней ионосферы проводятся в Харькове с 1996 г. За это время накоплен обширный материал, охватывающий около полуцикла солнечной активности [1–2]. В данной работе рассматриваются солнечно-циклические закономерности в поведении концентрации ионов водорода над Харьковом в зимнее время 1996–1999 гг. Этому периоду соответствует переход от низкой к высокой солнечной активности и изменение потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ от 70 до 170 ед. (в 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹). Известно, что солнечно-циклические вариации ионосферных параметров обусловлены как вариациями ионизирующего излучения Солнца, так и изменениями параметров термосферы в цикле солнечной активности. Поэтому исследуется также влияние теплового режима нейтральной атмосферы на поведение ионов водорода при разных уровнях СА.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ В ХОРЬКОВЕ

Харьковский институт ионосферы проводит исследования методом некогерентного рассеяния в течение более чем 30 лет. Метод позволяет получать наиболее полный объем информации о параметрах ионосферной плазмы с высокой точностью и в интервале высот от 100 до нескольких тысяч километров. Радар расположен вблизи г. Харькова (геомагнитные координаты: 45.7° , 117.8° , географические координаты: 49.6° , 36.3°) и работает на частоте 158 МГц с максимальной мощностью передатчика 3.6 МВт (средняя мощность — 100 кВт), поляризация — круговая. Зенитная 100-м параболическая антенна Кассегрена имеет коэффициент усиления около 12700 (эффективная поверхность около 3700 м^2 , ширина луча 1°). Температура системы — 570–1320 К, шумовая температура высокочувствительного приемника — 120–240 К. Для исследования внешней ионосферы применяется режим зондирования одиночным 800-мкс импульсом, который обеспечивает измерение легких ионов до высот 1300–1500 км. Накопление сигнала в течение 15 мин при входных соотношениях сигнал/шум 10–0.1 позволяет определять ионосферные параметры с точностью около 3–20 %. Температуры и ионный состав находятся методом наименьших квадратов путем сравнения экспериментальных автокорреляционных функций (АКФ) рассеянного сигнала с теоретически рассчитанными. Описание устройств радара, методик измерения и обработки данных в различных режимах работы смотрите в работах [3–4].

3. ФАКТОРЫ, КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ВЫСОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ ВОДОРОДА

Поведение ионов водорода H^+ характеризует состояние верхней атмосферы Земли и определяется такими ее параметрами, как концентрация заряженных частиц, температура плазмы и нейтральной атмосферы, нейтральный состав, в том числе концентрации атомов кислорода и водорода, которые через реакцию обмена зарядами $\text{H} + \text{O}^+ \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{O}$ влияют на концентрацию ионов водорода, а также процессами переноса плазмы и ионосферно-плазмосферного взаимодействия [5–6]. Высотное распределение заряженных частиц в многокомпонентной внешней ионосфере в общем случае может быть найдено путем численного интегрирования системы уравнений непрерывности и движения для ионов O^+ , H^+ и электронов. Для ионов водорода уравнение непрерывности имеет вид:

$$\frac{\partial n(\text{H}^+)}{\partial t} = q(\text{H}^+) - L(\text{H}^+) - \text{div}\{\Phi(\text{H}^+)\},$$

где $q(\text{H}^+)$ — скорость образования ионов водорода; $L(\text{H}^+)$ — скорость потерь за счет химических процессов; $\text{div}\{\Phi(\text{H}^+)\} = \text{div} n(\text{H}^+) \mathbf{V}_d$ — локальный источник образования ионов или их потерь в результате процессов переноса (диффузии), \mathbf{V}_d — вектор скорости диффузии. Преобладание фотохимических или диффузионных процессов зависит

от соотношения их временных констант, которые определяются перечисленными выше параметрами заряженных и нейтральных компонентов атмосферы. На некоторой высоте эти константы сравниваются. Обычно для ионов H^+ это происходит на высотах 350–550 км. Ниже указанного уровня преобладают условия фотохимического равновесия, а выше — диффузионного равновесия.

В переходной области между верхней частью слоя F2 и протоносферой, где преобладают ионы O^+ , а ионы H^+ являются второстепенным компонентом, в условиях фотохимического равновесия, как и в случае диффузионного равновесия, концентрация ионов H^+ растет экспоненциально с высотой [7]:

$$n(H^+) \propto \exp(z'/H(7)),$$

где $H(7)$ — приведенная высота ионов с «эффективной» массой 7 а. е., z' — геопотенциальная высота. В области, где доминируют ионы H^+ , в условиях статического диффузионного равновесия концентрация H^+ экспоненциально убывает с приведенной высотой плазмы:

$$n(H^+) \propto \exp(-z'/H(1/2)).$$

Очевидно, на промежуточных высотах должен находиться максимум концентрации H^+ . Условие статического диффузионного равновесия, о котором говорится выше, соответствует случаю нулевого потока заряженных частиц в покоящейся нейтральной атмосфере, когда в уравнении непрерывности для ионов H^+ член:

$$\operatorname{div}\{\Phi(H^+)\} \approx \partial\phi_z/\partial z = 0 \quad \text{и} \quad \mathbf{V}_d = 0.$$

В общем случае в многокомпонентной внешней ионосфере распределение концентрации $n_j(s)$ заряженного компонента (j), который диффундирует через неподвижный преобладающий компонент (i) вдоль магнитной силовой линии (с координатой s), находится путем решения уравнения непрерывности, которое в стационарных условиях в отсутствие источников и потерь и в пренебрежении расходимостью магнитных силовых линий имеет вид [5–6]:

$$\frac{\partial}{\partial s} n_j V_j = \frac{\partial}{\partial s} \left[-D_{ji} \left(\frac{\partial n_j}{\partial s} + \frac{n_j}{H_j} - \frac{n_j}{H_p} \right) \right] = 0.$$

Этому уравнению в общем случае динамического диффузионного равновесия удовлетворяет решение с постоянным ненулевым потоком: $\Phi = n_j V_j = \text{const}$ и распределение концентрации компонента (j):

$$n_j(s) = n_j^{(1)}(1 - \Phi/\Phi_L) + n_j^{(2)} \Phi/\Phi_L.$$

Здесь $n_j^{(1)}$ — решение при $\Phi = 0$ и $n_j^{(2)}$ — решение, которое соответствует случаю, когда $\Phi = \Phi_L$, где Φ — поток на верхней границе и Φ_L — предельный (максимально возможный) диффузионный поток ионов (в нашем случае H^+) вверх.

Рис. 1 иллюстрирует модельное представление о процессах ионосферно-плазмосферного взаимодействия и о высотном распределении концентрации ионов H^+ и O^+ во внешней ионосфере при различных значениях Φ/Φ_L [8].

На рис. 2 приведены высотные профили измеренных АКФ сигнала и рассчитанных из них температур ионов T_i , электронов T_e , относительных концентраций $n(H^+)/n_e$ и $n(He^+)/n_e$ для зимней ночи низкой и высокой СА. Видно, что с ростом активности Солнца концентрация ионов водорода уменьшается. Зимой ночью ионы H^+ становятся доминирующими на высотах около 500 км при низкой СА (1996 г.) и 800 км при высокой СА (1999 г.).

Обнаружено также, что циклические вариации в поведении концентрации ионов водорода сопровождаются изменениями характера их высотного распределения, что свидетельствует, по-видимому, об изменении процессов ионосферно-плазмосферного взаимодействия. Можно предположить, сравнивая измеренные высотные профили ионов H^+ (рис. 2) с теоретическими (рис. 1), что зимой в минимуме СА (1996 г.) поток ионов водорода был восходящим ($\Phi = nV_z > 0$) и близким к критическому значению, тогда как при высокой СА (1999 г.) наблюдался нисходящий поток ионов $\Phi < 0$ из протоносферы, являющийся источником плазмы для ночной области F. Это свидетельствует об изменении в цикле СА характера взаимодействия ионосферы с лежащей выше плазмосферой, а также магнитно-сопряженных ионосфер через плазмосферу [5].

4. СОЛНЕЧНО-ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Давно замечено, что параметры области F ионосферы изменяются в цикле солнечной активности. Исследования внешней ионосферы и околоземной плазмы с помощью метода некогерентного рассеяния показали, что циклические вариации охватывают всю толщу ионосферы и имеют ряд определенных закономерностей. Как известно, нарушения в поведении ионов водорода отражают глобальные изменения в состоянии околоземного космического пространства. Так, граница перехода h_t от ионосферы к протоносфере, где $n(O^+) \approx n(H^+)$, определяется соотношением конкретных физико-химических и динамических процессов в верхней атмосфере и зависит от времени суток, сезона года, солнечной и магнитной активности и других условий. Малейшее изменение этих условий приводит к нарушению сложившегося равновесия в плазме и четко отслеживается в поведении ионов водорода и высоты h_t . Поэтому исследование морфологии и динамики легких ионов дает важную информацию о состоянии верхней атмосферы Земли и геокосмоса, взаимосвязи солнечно-земных явлений и используется для мониторинга и прогнозирования «космической погоды».

Для рассмотрения циклических закономерностей взяты зимние месяцы 1996–1999 гг. Этому периоду соответствует переход от низкой к высокой СА и изменение потока радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ от 70 до 170 (в единицах 10^{-22} Вт m^{-2} Гц $^{-1}$). Выбранные даты и соответствующие им параметры солнечной и магнитной активности приведены в таблице. Здесь A_p — суточный планетарный индекс магнитной активности; $F_{10.7}$ и $F_{10.7A}$ — потоки радиоизлучения Солнца в конкретный день и усредненный за три оборота Солнца соответственно; параметр $F_{10.7}^I = F_{10.7A} + (F_{10.7} - F_{10.7A})/3$ учитывает совместное влияние двух индексов солнечного излучения. Рассматриваемые даты соответствуют относительно спокойным геомагнитным условиям.

4.1. Тепловой режим нейтральной атмосферы над Харьковом при различных уровнях солнечной активности

Известно, что с увеличением СА растут интенсивность ионизирующего излучения Солнца и эффективность солнечного нагрева термосферы, происходит ее расширение и изменение состава. Соответственно изменяются и параметры ионосферы, возрастает электронная концентрация в максимуме слоя, при этом растет концентрация “тяжелых” компонент (нейтралов и ионов) в верхней атмосфере, которые вытесняют “легкие” ионы на большие высоты. Рис. 3 иллюстрирует тепловой режим нейтральной атмосферы при различных уровнях СА. Показаны изменения максимальных (послеполуденных) и минимальных (предвосходных) значений экзосферной температуры $T_{\text{экз}}$.

Величины $T_{\text{экз}}$ рассчитаны для Харькова по методике, описанной в [9], с привлечением результатов измерения электронной концентрации N_e , температур электронов T_e и ионов T_i , полученных на радаре НР, и модели нейтральной атмосферы MSIS-86 [10].

Видно, что росту СА от 70 до 170 ед. соответствует повышение $T_{\text{экз.min}}$ от 650 до 850 К и $T_{\text{экз.max}}$ от 900 до 1100 К. Зависимости $T_{\text{экз}} = f(F_{10.7}^I)$ для термосферы над Харьковом в условиях зимы аппроксимируются линейными выражениями

$$T_{\text{экз.min}} \approx 480 + 2.2 F_{10.7}^I \text{ (Зима. Ночь)} \text{ и } T_{\text{экз.max}} \approx 756 + 2.0 F_{10.7}^I \text{ (Зима. День)}.$$

4.2. Циклические вариации концентрации ионов H^+

На рис. 4 приведены зависимости концентрации ионов водорода $n(H^+)$ и относительной концентрации $n(H^+)/n_e$ на высоте 550 км от индекса $F_{10.7}^I$ для зимы.

Рассматривается максимум $n(H^+)$ в суточном цикле (перед восходом Солнца), в формирование которого вносит вклад ночное охлаждение термосферы. Результаты получены по данным почасового усреднения. Видно, что с ростом СА в диапазоне значений $F_{10.7}^I = 70\text{--}170$ ед. концентрация ионов водорода $n(H^+)$ уменьшилась от $2.3 \cdot 10^4$ см $^{-3}$ до $0.16 \cdot 10^4$ см $^{-3}$, т. е. более чем в 14 раз. Зависимости $n(H^+) = f(F_{10.7}^I)$, $n(H^+)/n_e = f(F_{10.7}^I)$ и $n(H^+) = f(T_{\text{экз}})$ аппроксимируются экспоненциальными выражениями:

$$n(\text{H}^+) \approx 28.2 e^{-0.033 F_{10.7}^I},$$

$$n(\text{H}^+)/n_e \approx 1020 e^{-0.0357 F_{10.7}^I},$$

$$n(\text{H}^+) \approx 28505.7 e^{-0.014 T_{\text{экз}}}.$$

Итак, с ростом СА температура нейтральной атмосферы увеличивается по линейному закону. Концентрация ионов водорода экспоненциально уменьшается с ростом индекса $F_{10.7}^I$ и с ростом температуры нейтральной атмосферы $T_{\text{экз}}$.

4.3. Циклические вариации высоты перехода от ионов O^+ к ионам H^+

Как известно, высота перехода h_t от ионосферы к протоносфере, где $n(\text{O}^+) \approx n(\text{H}^+)$, определяется совместными вариациями концентрации ионов O^+ и H^+ , имеющими противоположный характер.

На рис. 5 приведены изменения высоты h_t от индекса солнечной активности $F_{10.7}^I$ и от температуры экзосферы $T_{\text{экз}}$. Видно, что зимой ночью с ростом СА h_t растет от 500 до 750 км, т.е. на 250 км. Рост h_t сопровождается увеличением температуры $T_{\text{экз}}$ от 650 до 900 К, т. е. на 250 К. Зависимости h_t от параметров $F_{10.7}^I$ и $T_{\text{экз}}$ носят логарифмический характер:

$$h_t \approx -624 + 266 \ln F_{10.7}^I, \quad h_t \approx -4282 + 740 \ln T_{\text{экз}}.$$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью радара некогерентного рассеяния в Харькове получены новые данные о солнечно-циклических вариациях концентрации ионов водорода во внешней ионосфере восточноевропейского региона Земли. Они свидетельствуют также об изменении в цикле СА процессов обмена плазмой между ионосферой и протоносферой и характера взаимодействия магнитно-сопряженных ионосфер через плазмосферу. Результаты измерений в Харькове удачно восполняют пробел в информации, получаемой главным образом с помощью радаров американского континента. Они были использованы для тестирования современных моделей внешней ионосферы, в том числе модели FLIP [11].

Работы выполнены при поддержке Гранта ННФ (США) АТМ-97-14638 Массачусетскому Технологическому институту (МТИ), США и Субконтракта МТИ с Институтом ионосферы # 4500105160.

Авторы благодарны Лысенко В. Н., Емельянову Л. Я., Склярору И. Б. за проведение измерений на радаре НР, Болибок А. В. за выполнение вычислений на компьютере.

1. Таран В. И., Григоренко Е. И., Кияшко Г. А. Особенности поведения ионов водорода во внешней ионосфере над Харьковом в период высокой солнечной активности // *Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*: Сб. науч. тр.-в. – Харьков: ХГПУ, вып. 4, 2001, с. 258–260.

2. Кияшко Г. А., Григоренко Е. И. Особенности высотно-временного распределения ионов водорода над Харьковом//*Вестник ХГПУ*, вып. **103**, 2000, с. 45–47.
3. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния//*Геомагнетизм и аэронаука*, т. **41**, 2001, № 5, с. 659–666.
4. Лысенко В. Н. Особенности корреляционной обработки НР–сигнала при зондировании ионосферы в метровом диапазоне радиоимпульсами длительностью 800 мкс//*Вестник Харьковского государственного политехнического университета*. Сб. научн. трудов. Ионосфера. – Харьков: ХГПУ, вып. **31**, 1999, с. 90–95.
5. Кринберг И. А., Ташилин А. В. *Ионосфера и плазмаосфера*.– М.: Наука, 1984.
6. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. *Физика ионосферы*.– М.: Наука, 1987.
7. Bauer S. J. Hydrogen and helium ions//*Annales de Géophysique*, vol. **22**, no. 2, 1966, pp. 247–254.
8. Geisler E., Bowhill S. A. An investigation of ionosphere-protonosphere coupling//*Aeronomy Rep.*, vol. **5**, University of Illinois, Urbana, 1965
9. Salah J. E., Evans J. V., Alcaydé D., Bauer P. Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and St-Santin//*Ann. Geophys.*, vol. **32**, fasc.3, 1976, p. 257–266.
10. Hedin A. E. MSIS-86 thermospheric model//*J. Geophys. Res.*, vol. **92**, 1987, p.4649–4662.
11. Erickson P. J., Taran V. I., Foster J. C. et al. , Simultaneous Longitudinal and Latitudinal Topside Light Ion Variations From Kharkov, Millstone Hill, and Arecibo Radar Observations//EOS Trans. AGU, 80(46), 1999 Fall Meet., F771, 1999.

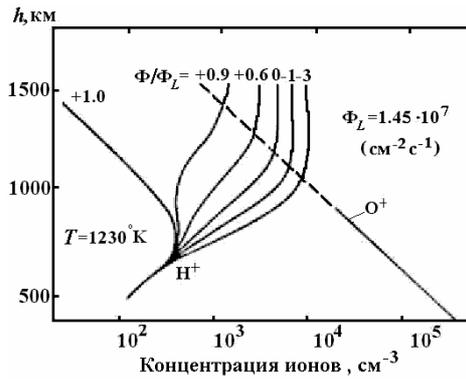


Рис. 1. Примеры численных расчетов высотных распределений $n(H^+)$ и $n(O^+)$ для разных значений Φ/Φ_L [8]

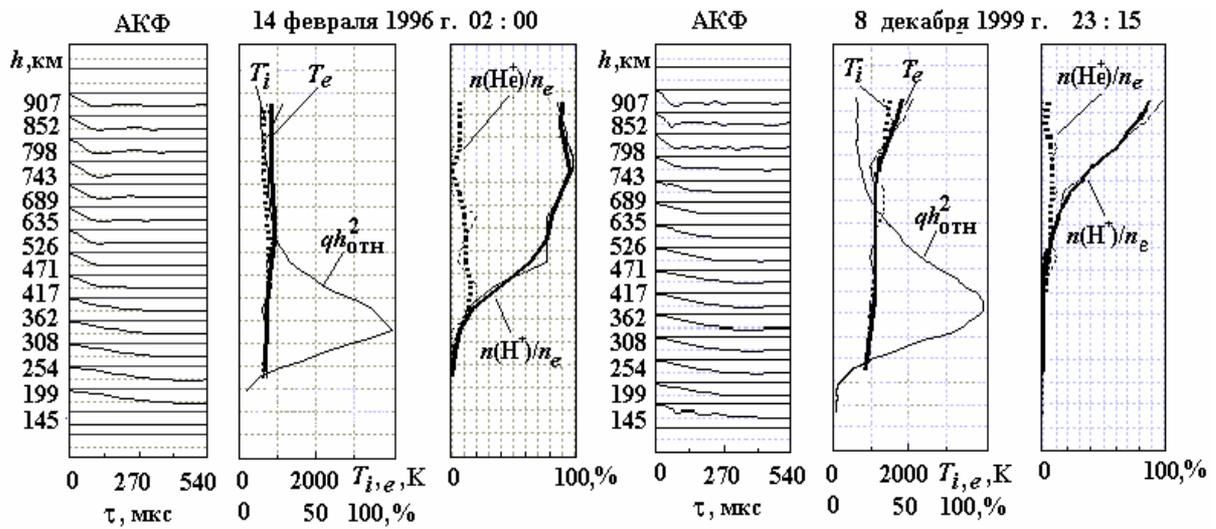


Рис. 2. Высотные профили измеренных АКФ сигнала и вычисленных из них (тонкие линии) температур T_i, T_e , относительных концентраций $n(H^+)/n_e$ и $n(He^+)/n_e$ для зимней ночи низкой (1996 г.) и высокой (1999 г.) активности Солнца. Толстые линии представляют результат скользящего сглаживания параметров по высоте

Таблица 1. Параметры солнечной и магнитной активности

Дата	A_p	$F_{10.7}$	$F_{10.7A}$	$F_{10.7}^l$
13–14.02.1996	14, 15	71, 70	70	69
4–5.11.1997	8, 7	115, 111	91	98
2–4.12.1997	4, 6, 6	109, 109, 104	93, 94, 94	98
21–25.11.1998	7, 7, 10, 12, 9	121, 126, 130, 140, 150	138, 138, 139, 139, 140	138
8–10.12.1999	13,12,7	150,156,164	177	170

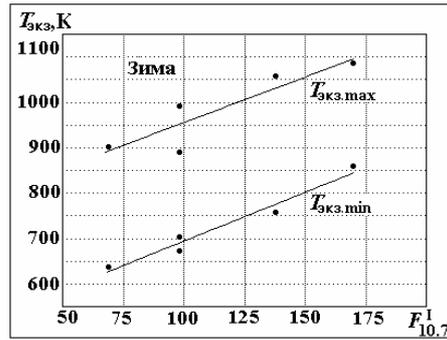


Рис.3. Зависимости максимальных и минимальных (в суточном цикле) значений $T_{\text{экз}}$ от уровня СА

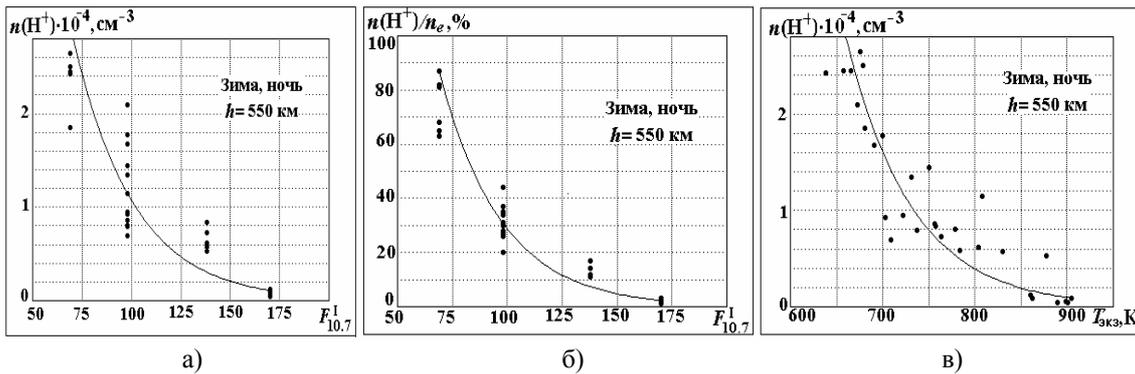


Рис.4. Зависимости концентрации ионов водорода $n(H^+)$ на высоте 550 км (а) и относительной концентрации $n(H^+)/n_e$ (б) от индекса солнечной активности $F_{10.7}^I$ и зависимость $n(H^+)$ от экзосферной температуры $T_{\text{экз}}$ (в) для Харькова зимой ночью

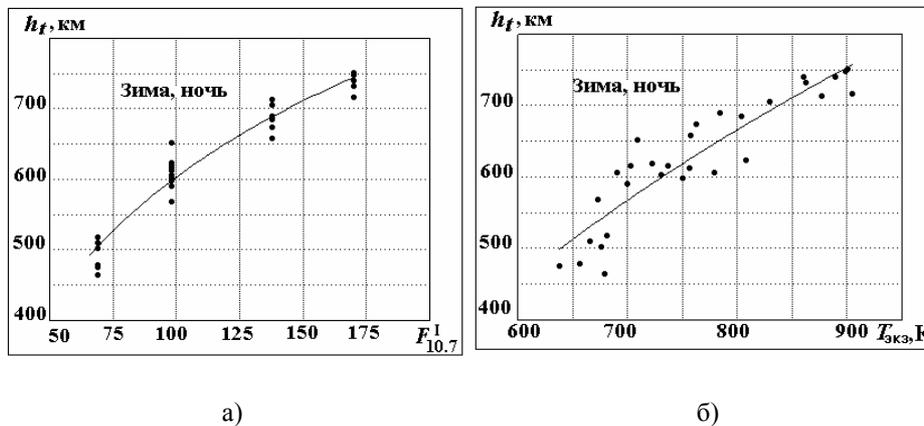


Рис. 5. Зависимости высоты перехода h_f от индекса $F_{10.7}^I$ (а) и от экзосферной температуры $T_{\text{экз}}$ (б)