

## ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПОЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

С.З. Беккер

Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия  
susanna.bekker@gmail.com

## ASSESSMENT AND ANALYSIS OF PROBABILISTIC FIELDS OF THE LOWER IONOSPHERE PARAMETERS FOR CALCULATING ELECTRON CONCENTRATION

S.Z. Bekker

Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, Russia  
susanna.bekker@gmail.com

**Аннотация.** В настоящей работе представлены результаты обработки и анализа многолетних данных о поведении составляющих нейтральной атмосферы со спутника AURA. Построены и проанализированы функции плотности вероятности температуры и концентрации нейтральной атмосферы, исследованы их широтные, сезонные и суточные зависимости на различных высотах и при различной солнечной активности. Проведен расчет концентрации электронов нижней ионосферы с использованием полученных данных в условиях солнечной вспышки.

**Ключевые слова:** моделирование ионосферы, концентрация электронов, спутниковые данные, теория вероятности, статистический анализ, функции плотности вероятности.

**Abstract.** The results of processing and analysis of the atmospheric data from satellite AURA are presented in this paper. The probability density functions (PDFs) of temperature and neutral components concentration are plotted and analyzed. Dependence of PDFs on latitude, season and time of a day is explored. Obtained values of ionosphere parameters were used to calculate electron concentration during a solar flare.

**Keywords:** ionosphere modeling, electron concentration, satellite data, theory of probability, statistical analysis, probability density functions.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, концентрация и температура нейтральных составляющих оказывают большое влияние на фотохимию  $D$ -области ионосферы. Поэтому точность расчета концентраций заряженных компонент напрямую связана с наличием в достаточном объеме экспериментальных данных нейтральной атмосферы, используемых в качестве входных параметров плазмохимических моделей.

При решении систем уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла в каких-либо конкретных гелиогеофизических условиях необходимо понимать, за какие временные периоды и в каких пространственных диапазонах экспериментальные данные корректно усреднять (или объединять для построения функций плотности вероятности и определения наиболее вероятных значений). Задача выбора диапазонов гелиогеофизических условий, в рамках которых параметры меняются несущественно, довольно сложна и до конца не изучена.

Электронная концентрация  $N_e$  по-разному реагирует на изменение значений входных параметров. Чтобы оценить, насколько  $N_e$  чувствительна к вариациям того или иного параметра, был проведен анализ чувствительности решений уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла. Было получено, что (помимо скорости ионизации  $q$ )  $N_e$  в первую очередь зависит от температуры нейтралов  $T$  и концентрации  $[O_2]$ , а влияние концентраций малых нейтральных составляющих на порядки ниже [Беккер и др., 2016]. Поэтому основной целью настоящей работы является более корректное определение температуры и общей концентрации нейтралов  $M$  в нижней ионосфере по многолетним экспериментальным спутниковым данным.

### ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

В ходе работы были обработаны и проанализированы экспериментальные данные нейтральной атмосферы со спутника AURA за 15 лет. На рис. 1 представлено распределение данных по зенитному углу и по месяцам, а на рис. 2 — пространственное распределение измерений. Как видно из рис. 2, больше всего значений было получено на экваториальных и полярных широтах, где среда наименее устойчива.

Из-за того, что спутник AURA имеет солнечно-синхронную орбиту, среди его данных отсутствуют необходимые всевозможные комбинации зенитного угла, сезона и широты. Поэтому для определения гелиогеофизических условий, наиболее сильно влияющих на поведение  $T$  и  $M$ , для каждого параметра была исследована широтная, долготная, суточная и сезонная зависимость при разных уровнях солнечной активности.

На рис. 3 показана широтная зависимость температуры нейтралов  $T$  на высоте  $h = 90$  км для одного дня в августе (слева) и для значений, накопленных за все августы в течение 15 лет (справа). На правом графике цветом показано значение функции плотности вероятности температуры  $P(T)$ , нормированное на ее максимум. Изображения на рис. 3 имеют схожий профиль, наибольшее отличие наблюдается на широтах  $|\varphi| < 20^\circ$ , однако и здесь суточные значения всего на 3–5 % отличаются от наиболее вероятных величин, полученных при объединении всех августовских данных. В любом случае, температура имеет ярко выраженную широтную зависимость, поэтому

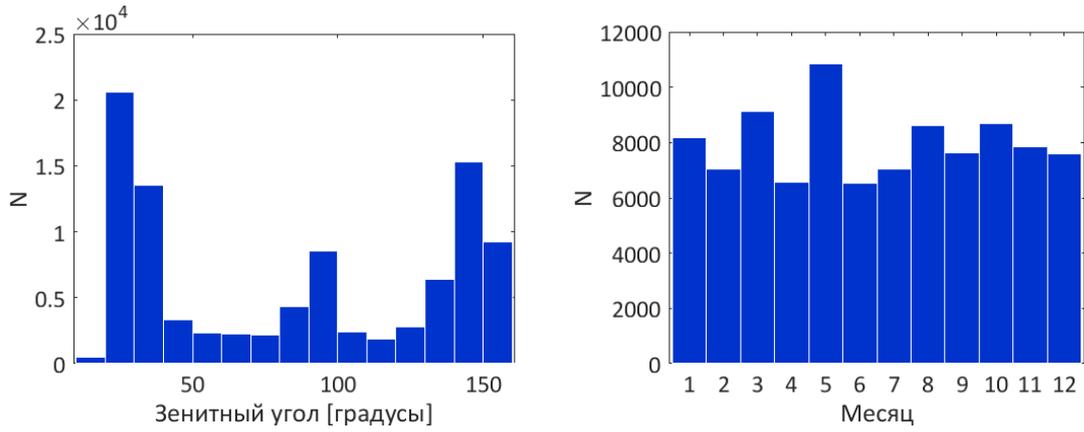


Рис 1. Распределение данных со спутника AURA за 15 лет по зенитному углу (слева) и месяцам (справа)

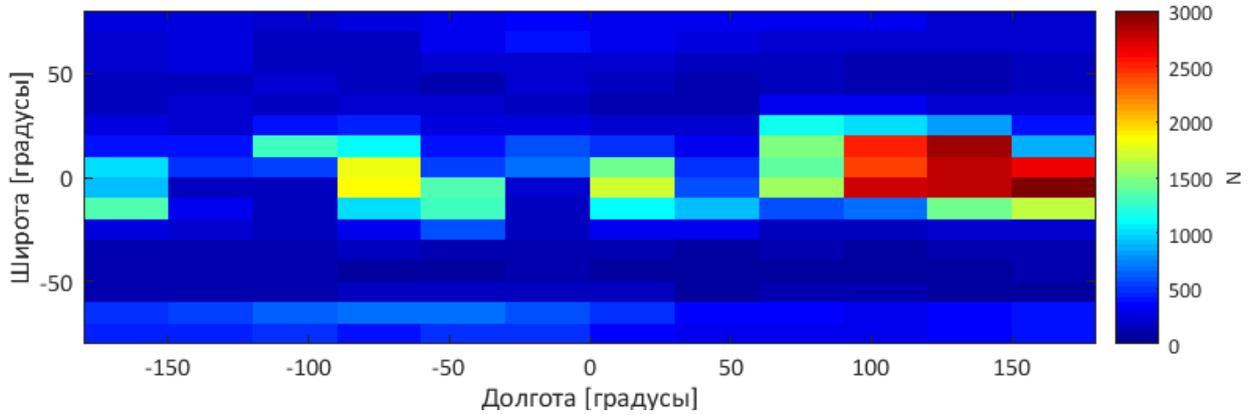


Рис 2. Пространственное распределение данных со спутника AURA за 15 лет

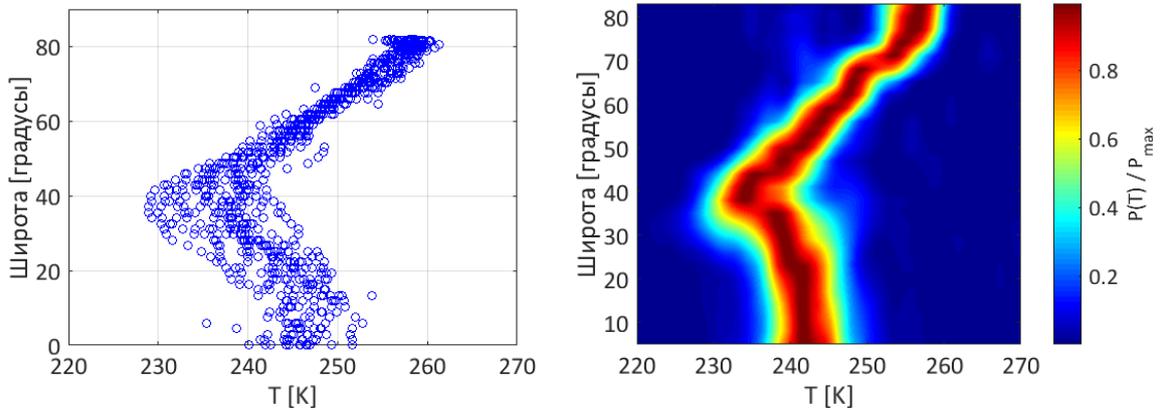


Рис. 3. Широтное распределение значений  $T$  для 11.08.2004 (слева) и широтная зависимость нормированной функции плотности вероятности  $P(T)$  для всего августа (справа) ( $h=90$  км)

при работе в каких-то конкретных гелиогеофизических условиях шаг по широте  $\Delta\varphi$  должен быть достаточно мелким, чтобы изменение не было принципиальным. Например, в рассмотренных условиях при выборе  $\Delta\varphi=10^\circ$  разница между «соседними» по широте значениями  $T$  не превышает 3.5 %.

Концентрация нейтралов  $M$  практически не имеет широтной зависимости. Можно лишь отметить, что при малых широтах ( $\varphi < 20^\circ$ ) увеличивается разброс значений, и функция плотности вероятности  $P(M)$  имеет «тяжелые хвосты».

Как и следовало ожидать, температура нейтралов  $T$  имеет сезонную зависимость на любых высотах и при любой солнечной активности. Сезонный ход

концентрации нейтралов  $M$  можно наблюдать лишь на высотах  $h \leq 80$  км. Более того, из рис. 4 видно, как сильно может меняться зависимость от времени года на различных широтах: при  $\varphi > 40^\circ$  в течение года концентрация может меняться в 4 раза, а при  $0^\circ < \varphi < 40^\circ$  колебания совершенно не существенны.

Суточный ход обсуждаемых параметров в диапазоне высот  $50 \leq h \leq 90$  км выявить не удалось. Влияние солнечной активности оказалось выражено только в увеличении разброса значений с ростом индекса  $F10.7$ , медианы и наиболее вероятные значения температуры и концентрации с ней не коррелируют при любых гелиогеофизических условиях.

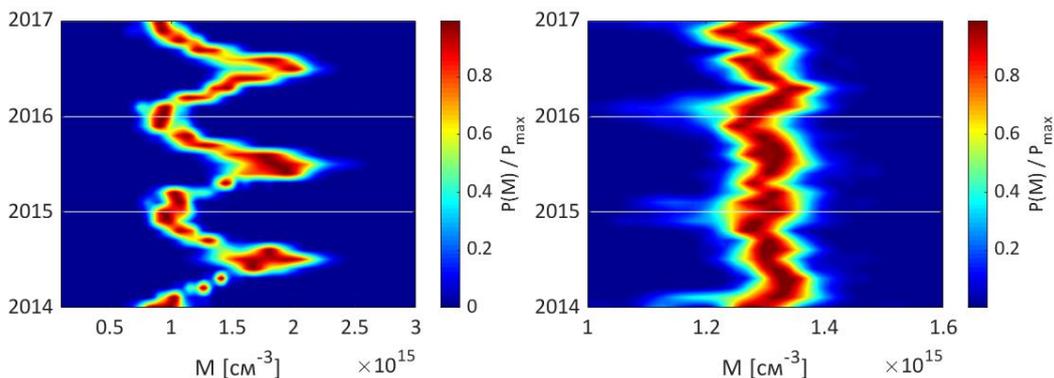


Рис. 4. Сезонная зависимость концентрации нейтралов при  $h=70$  км для  $\varphi > 40^\circ$  (слева) и  $0^\circ < \varphi < 40^\circ$  (справа)

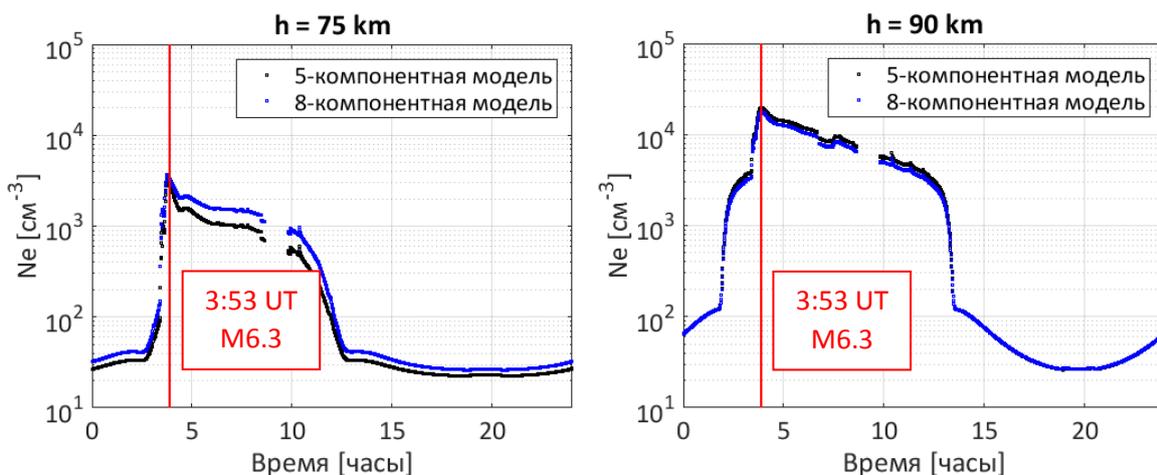


Рис. 5. Концентрация электронов во время вспышки 09.03.12 при  $h = 75$  км и  $h = 90$  км

### РАСЧЕТ СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

В настоящем исследовании расчет  $N_e$  на высотах  $D$ -области проводился с использованием 5- и 8-компонентной моделей [Егошин и др., 2012; Кудрявцев, Романюха, 1995], включающих в качестве входных параметров  $T$ ,  $q$ ,  $[O_2]$ ,  $[N_2]$ ,  $[H_2O]$ ,  $[CO_2]$ ,  $[O_3]$ ,  $[O]$ . С учетом представленного выше статистического анализа были выбраны соответствующие диапазоны гелиогеофизических условий, определены точки максимума функций плотности вероятности входных параметров и с ними решены системы уравнений ионизационно-рекомбинационного цикла. Была учтена ионизация космическими лучами, ионизация NO линией  $\Lambda\alpha$ , ионизация в УФ и рентгеновском диапазонах. Результаты расчета  $N_e$  на двух высотах во время солнечной вспышки 9 марта 2012 г. мощностью M6.3 представлены на рис. 5. Потoki излучения, соответствующие этой вспышке, были взяты со спутников GOES и SDO.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный вероятностно-статистический анализ экспериментальных данных со спутника AURA позволил свести ошибку в задании температуры и концентраций нейтральных составляющих к минимуму. В связи с этим точность расчета заряженных компонент сейчас в первую очередь зависит от профиля скорости ионизации и выбранной ионизацион-

но-рекомбинационной схемы. И в спокойных условиях, и во время вспышки была получена несущественная разница между результатами 5- и 8-компонентной моделей, особенно на высотах  $h > 75$  км. Верификация полученных результатов по экспериментальным данным распространения СДВ-ДВ является следующим этапом данной работы. Сопоставление с экспериментом позволит сделать вывод о корректности использованного профиля  $q$  и целесообразности выбора той или иной плазмохимической модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н. О некоторых методах повышения точности статистических моделей  $D$ -области ионосферы // Труды IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». 2016. С. 62–66.
- Егошин А.А., Ермак В.М., Зецер Ю.И. и др. Влияние метеорологических и волновых процессов на нижнюю ионосферу в условиях минимума солнечной активности по экспериментальным данным по распространению СДВ-ДВ в средних широтах // Физика Земли. 2012. № 3. С. 101–112.
- Кудрявцев В.П., Романюха Н.Ю. Моделирование ионизационно-рекомбинационных процессов в средней атмосфере // Математическое моделирование. 1995. Т. 7, № 3. С. 3–18.