

С. М. Черняков

## Экспериментальное определение эффективных коэффициентов рекомбинации в $D$ -области ионосферы высоких широт во время солнечных затмений по данным метода частичных отражений

Фотохимическая теория процессов в нижней ионосфере сложна и до конца не разработана, поэтому введение эмпирических эффективных коэффициентов, определяющих суммарную скорость нескольких реакций, получило широкое распространение при моделировании  $D$ -области ионосферы. Экспериментальные возможности получения значений эффективного коэффициента рекомбинации достаточно ограничены. Один из методов, позволяющих определить эффективные коэффициенты рекомбинации, использует явление солнечного затмения. В основе этого метода лежит идея Э. Эплтона о подобии поведения линейной индуктивной цепи и изменения электронной концентрации в ионосфере на фиксированной высоте при отсутствии процессов переноса, изменении скорости образования электронов во времени и исчезновении свободных электронов за счет рекомбинации. По аналогии с постоянной времени электрической цепи Эплтон назвал реакцию ионосферы на процесс ионизации инерционностью ионосферы с характерной постоянной времени  $\tau$ , которую называют также "временем релаксации" или просто "постоянной времени ионосферы". Во время солнечных затмений 11 августа 1999 г., 1 августа 2008 г., 11 июня 2011 г., 20 марта 2015 г. на установке частичных отражений, расположенной на радиофизическом полигоне "Туманный" (69.0 с. ш., 35.7 в. д.), проведены регистрации амплитуд отражения обыкновенной и необыкновенной волн. Исходя из полученных данных, рассчитано двумерное (время, высота) распределение электронной концентрации  $n_e$  на высотах  $D$ -области ионосферы. Это позволило определить поведение электронной концентрации во времени на выбранных высотах (временные профили электронной концентрации на выбранных высотах). На основе полученных экспериментальных профилей рассчитаны эффективные коэффициенты рекомбинации на высотах  $D$ -области ионосферы. Процессы переноса плазмы (например, распространение акустико-гравитационных волн, вертикальные движения) во время затмений повлияли на поведение временных профилей электронной концентрации на высотах  $D$ -области ионосферы. Это привело к тому, что на некоторых высотах  $D$ -области ионосферы определение эффективного коэффициента рекомбинации стало невозможным.

**Ключевые слова:** нижняя ионосфера, солнечное затмение, эффективный коэффициент рекомбинации.

### Введение

Наиболее трудной для экспериментального и теоретического исследования является  $D$ -область ионосферы. Фотохимия процессов в  $D$ -области ионосферы достаточно сложна и до конца не разработана. Требуют уточнения фотохимические схемы, существуют неопределенности в коэффициентах отдельных реакций и концентрациях малых нейтральных составляющих. Поэтому введение эффективных коэффициентов рекомбинации (ЭКР), определяющих суммарную скорость нескольких реакций, получило широкое распространение при моделировании нижней ионосферы, особенно  $D$ -области [1; 2].

Возможности получения значений ЭКР ограничены, поэтому большое значение имеют все экспериментальные методы, которые могут их определить. Один из таких методов основан на наблюдении изменений электронной концентрации (ЭК) в ионосфере во время солнечного затмения (СЗ) [3]. Интенсивность солнечного ионизирующего излучения во время СЗ имеет кратковременное и известное поведение, что позволяет исследовать фотохимические процессы при известных входных параметрах. Временная задержка между максимумом затмения (минимумом солнечного излучения) и минимумом ЭК во время затмения позволяет рассчитать ЭКР на рассматриваемой высоте ионосферы при известной величине электронной концентрации.

Этот метод с хорошим приближением можно использовать при отсутствии переноса электронов, что выполняется не всегда. Появление акустико-гравитационных волн (АГВ), вертикальные движения плазмы и т. п. во время затмения, меняют идеальную картину поведения ЭК, которая должна быть подобна изменению ионизирующего излучения Солнца во время затмения. Это усложняет возможность получения значений ЭКР на основе экспериментальных данных и требует дополнительных методов анализа.

### Определение эффективного коэффициента рекомбинации во время солнечного затмения

Величина электронной концентрации в месте наблюдения может изменяться в зависимости от скорости ионизации, процессов переноса плазмы в области наблюдения, а также в результате исчезновения свободных электронов в процессе рекомбинации или прилипания к нейтралам. Рекомбинация представляет собой процесс, обратный ионизации, т. е. процесс нейтрализации. Ввиду сложности процессов рекомбинации в каждой отдельной реакции исчезновения электронов для описания процесса рекомбинации вводят эффективный коэффициент рекомбинации  $\alpha_{\text{эфф}}$ , который определяют как суммарную скорость исчезновения электронов в нескольких реакциях за единицу времени в единице объема. Подобным образом вводят понятие эффективной скорости образования электронов  $q$ , которую определяют как количество электронов, появившихся в единице

объема за единицу времени. При этом надо помнить, что ионизация вносит основной вклад в образование свободных электронов. Таким образом, эффективная скорость образования электронов – это фактически скорость ионизации, которая зависит, при прочих равных условиях, прежде всего от потока солнечного ионизирующего излучения. Использование этих двух понятий в нашем случае будет означать практически одно и то же, кроме случаев, когда их различие необходимо выделить особенно.

В  $D$ -области ионосферы поведение электронной концентрации  $n_e$  на фиксированной высоте при отсутствии процессов переноса при изменении скорости образования электронов во времени и исчезновении свободных электронов за счет рекомбинации подчиняется уравнению [4]

$$\frac{dn_e}{dt} = q - \alpha_{\text{эфф}} n_e^2. \quad (1)$$

Эплтон провел аналогию между изменением электронной концентрации в ионосфере и поведением линейной индуктивной цепи [5]. Продифференцировав уравнение (1) по времени, он получил уравнение

$$\frac{d^2 n_e}{dt^2} + 2\alpha_{\text{эфф}} n_e \frac{dn_e}{dt} = \frac{dq}{dt}. \quad (2)$$

Сравнив его с уравнением, описывающим поведение тока в индуктивной цепи,

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (3)$$

где  $I$  – электрический ток, протекающий по цепи с сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$  под воздействием электродвижущей силы  $\varepsilon$ , можно увидеть аналогию между коэффициентом  $1/(2\alpha_{\text{эфф}} n_e)$  в уравнении (2), описывающем ионосферу, и постоянной времени электрической цепи  $L/R$  в уравнении (3), описывающей электрическую цепь. Таким образом, можно ожидать, что экстремум электронной концентрации  $n_e$  будет достигнут через промежуток времени  $\tau = 1/(2\alpha_{\text{эфф}} n_e)$  после достижения экстремума скорости образования электронов  $q$ . По аналогии с постоянной времени электрической цепи  $L/R$  Эплтон назвал реакцию ионосферы на процесс ионизации инерционностью ионосферы с характерной постоянной времени  $\tau = 1/(2\alpha_{\text{эфф}} n_e)$ , которую называют "инерционность ионосферы" [4; 5], "время релаксации" [5; 6] или просто "постоянная времени ионосферы" [4; 7].

Данные рассуждения применимы для рассмотрения процессов изменения ЭК во время солнечного затмения. Величину постоянной времени ионосферы для этого случая можно найти, предположив, что минимум скорости образования электронов  $q$  будет в максимуме затмения, а электронная концентрация  $n_e$  достигнет своего минимума позднее через некоторый промежуток времени  $\Delta t$ .

Получим выражение для определения  $\Delta t$ . При достижении скоростью образования электронов  $q$  своего минимума  $q_{\text{min}}$  величина  $dq/dt = 0$  и уравнение (2) можно записать в виде

$$\left( \frac{d^2 n_e}{dt^2} \right)_{q_{\text{min}}} = -2\alpha_{\text{эфф}} n_{eq_{\text{min}}} \left( \frac{dn_e}{dt} \right)_{q_{\text{min}}}. \quad (4)$$

Используя линейное приближение теоремы Тейлора, можно получить величину изменения электронной концентрации  $(dn_e/dt)$  через промежуток времени  $\Delta t$  после достижения  $q$  своего минимума:

$$\frac{dn_e}{dt} = \left( \frac{dn_e}{dt} \right)_{q_{\text{min}}} + \left( \frac{d^2 n_e}{dt^2} \right)_{q_{\text{min}}} \Delta t. \quad (5)$$

Пусть  $\Delta t$  есть промежуток времени между минимумом скорости образования электронов  $q_{\text{min}}$  и минимумом электронной концентрации  $n_e$ , т. е. время релаксации  $\tau$ . В этом случае в минимуме электронной концентрации  $dn_e/dt = 0$  и, используя уравнения (4) и (5), получим

$$\Delta t = - \frac{\left( \frac{dn_e}{dt} \right)_{q_{\text{min}}}}{\left( \frac{d^2 n_e}{dt^2} \right)_{q_{\text{min}}}} = \frac{1}{2\alpha_{\text{эфф}} n_{eq_{\text{min}}}}. \quad (6)$$

Отметим, что величина  $n_{eq_{\text{min}}}$  в выражении времени задержки (6) равна величине ЭК в минимуме скорости образования электронов, т. е. где  $q = q_{\text{min}}$ .

Во время максимума затмения скорость образования электронов (скорость ионизации) становится минимальной, но при этом ЭК на выбранной высоте продолжает уменьшаться и своего минимума она достигает только через некоторое время  $\tau$ . Этот промежуток времени между максимумом затмения (минимумом

скорости ионизации) и минимумом ЭК по методу Эплтона определяют как время релаксации ионосферы  $\tau = 1/2\alpha_{эфф} n_{eq, min}$ . Таким образом, зная время релаксации на выбранной высоте ионосферы, можно определить эффективный коэффициент рекомбинации  $\alpha_{эфф}$  для этой высоты по формуле

$$\alpha_{эфф} = 1 / (2\tau n_{eq, min}), \quad (7)$$

где  $\tau$  – время релаксации;  $n_{eq, min}$  – ЭК в минимуме скорости образования электронов.

Для места наблюдения точные параметры солнечного затмения можно определить по астрономическому ежегоднику (см., например, [8]). Минимум электронной концентрации находится исходя из экспериментального профиля ЭК на выбранной высоте. Если во время СЗ измерения электронной концентрации проводились на нескольких высотах, то появляется возможность найти значения ЭКР для каждой из этих высот.

## Материалы и методы

### *Метод и установка частичных отражений*

Наиболее эффективным методом исследования  $D$ -области ионосферы является метод частичных отражений (МЧО), предложенный в начале 1950-х гг. F. Gardner и J. Pawsey [9]. Дальнейшее развитие этот метод получил в последующих работах [10; 11]. Он представляет собой радиолокационное зондирование нижней ионосферы в диапазоне средних волн. Метод относительно прост в реализации и позволяет получать сведения об электронной концентрации и параметрах неоднородностей на высотах нижней ионосферы.

В основе метода частичных отражений лежат излучение двух волновых мод (обыкновенной и необыкновенной волн) в виде чередующихся импульсов или линейно поляризованной волны на частотах в диапазоне от 2 до 8 МГц и обратное рассеяние радиоволн неоднородностями плазмы [12]. В первом случае производятся раздельный прием сигналов, частично рассеянных ионосферными неоднородностями, и измерение их амплитуд в зависимости от времени запаздывания, определяющего высоту отражения. Во втором случае принимаются две ортогональные линейные поляризации, из которых путем сложения со сдвигом фаз  $\pm 90^\circ$  формируются сигналы двух круговых компонент. Для определения параметров среды по данным МЧО можно использовать либо измерения амплитуд или разность поглощения вдоль траекторий распространения обыкновенной и необыкновенной радиоволн (метод дифференциального поглощения), либо прямые или косвенные измерения фазы (метод дифференциальной фазы и корреляционный метод) [12]. Измерения фазы обычно сложнее, чем измерения амплитуды, поэтому на практике наиболее широкое применение получил метод дифференциального поглощения [13]. Для получения наиболее полной и точной информации о нижней ионосфере необходимо проводить одновременные измерения амплитуды и фазы рассеянного сигнала.

Установка частичных отражений Полярного геофизического института (ПГИ) для исследования нижней ионосферы состоит из передатчика, приемника, приемно-передающей фазированной решетки и автоматизированной системы сбора данных. Она расположена на радиофизическом полигоне (р.ф.п.) "Туманный" (69.0 с. ш., 35.7 в. д.). Основные параметры и методика обработки сигналов приведены в работе [14]. Технические характеристики радиолокатора: рабочие частоты 2.60–2.72 МГц; мощность передатчика в импульсе около 60 кВт; длительность импульса 15 мкс; частота зондирования 2 Гц. Антенная решетка состоит из 38 пар скрещенных диполей, занимает площадь  $10^5 \text{ м}^2$  и имеет ширину диаграммы направленности по уровню половинной мощности около  $20^\circ$ . Поочередно принимаются две круговые поляризации, которые усиливаются приемником прямого усиления с полосой 40 кГц. Регистрацию амплитуд сигналов можно проводить в интервале высот от 30 до 240 км. Шаг снятия данных по высоте  $h = 0.5 \cdot n \text{ км}$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$ . На рис. 1 показан вид рабочего здания радиофизического полигона и антенного поля (а) и элементы антенной решетки (б).

### *Профили электронной концентрации*

Получаемые во время наблюдения амплитуды обыкновенной и необыкновенной волн используются для расчета ЭК. На рис. 2 приведена двумерная картина распределения ЭК по времени и высоте, полученная в день затмения 20 марта 2015 г. Двумерная картина позволяет получать профили ЭК по высоте для выбранного времени (например, линия 1 на рис. 2, см. рис. 3, а) и профили ЭК по времени для выбранной высоты (например, линия 2 на рис. 2, см. рис. 3, б).

Профили электронной концентрации по времени для различных высот (рис. 3, б) используются для нахождения задержки минимума ЭК относительно минимума скорости ионизации.

Изменение солнечной радиации, а следовательно ионизирующего излучения, во время затмения зависит в основном от покрытия диском Луны диска Солнца. Для описания изменения солнечного излучения вводят функцию затмения, которая представляет собой геометрическую функцию, равную отношению части диска Солнца незакрытого диском Луны к полной поверхности диска Солнца. Она является нормированной величиной, которая может изменяться от значения меньше 1 до 0 в зависимости от вида затмения. В пренебрежении излучением солнечного лимба и неравномерностью излучения поверхности Солнца изменение потока солнечного ионизирующего излучения подобно поведению функции затмения.

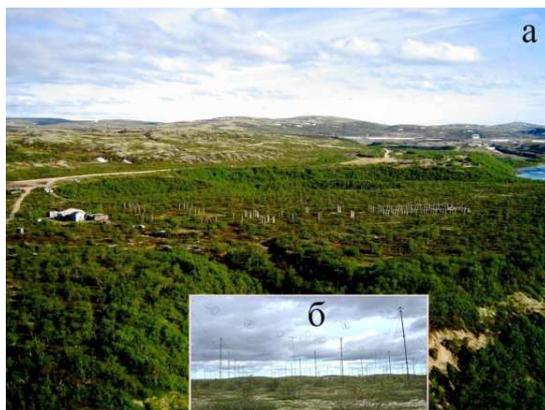


Рис. 1. Рабочее здание радиофизического полигона "Туманный" и антенное поле (а), элементы антенной решетки (б)

Fig. 1. Working building of the radiophysical observatory "Tumanny" and the antenna field (a), elements of the antenna array (b)

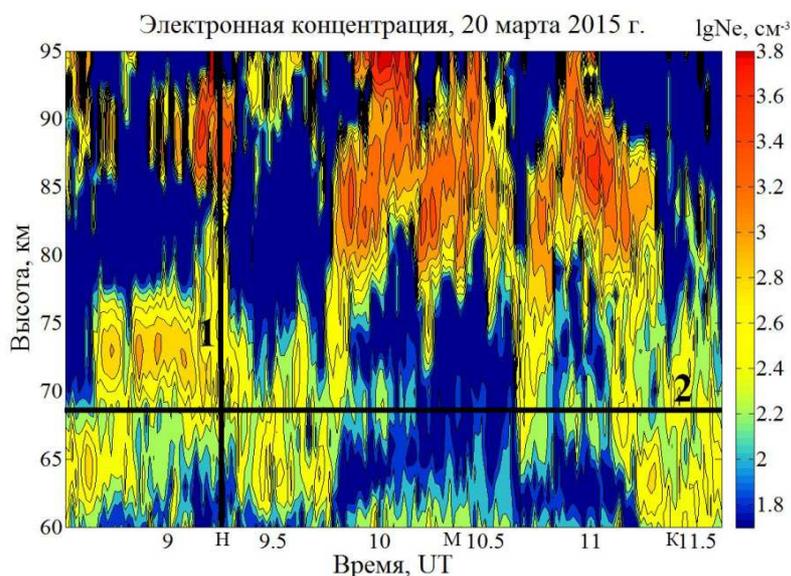


Рис. 2. Двумерная картина распределения электронной концентрации по времени и высоте в день затмения 20 марта 2015 г.

Fig. 2. A two-dimensional picture of the electron density distribution in time and altitude during the eclipse of 20 March, 2015

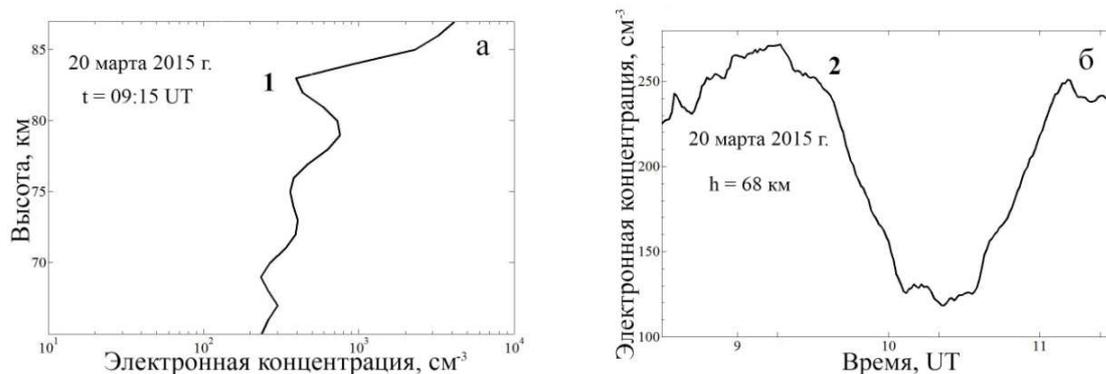


Рис. 3. Профиль электронной концентрации по высоте для выбранного времени (а) и профиль электронной концентрации по времени для выбранной высоты (б)

Fig. 3. The electron concentration profile along the height for the selected time (a) and the electron concentration profile on time for the selected height (b)

На рис. 4 приведен профиль электронной концентрации на высоте 68 км (точки), полином 9-й степени, описывающий поведение профиля ЭК, и функция затмения, адаптированная к профилю ЭК.

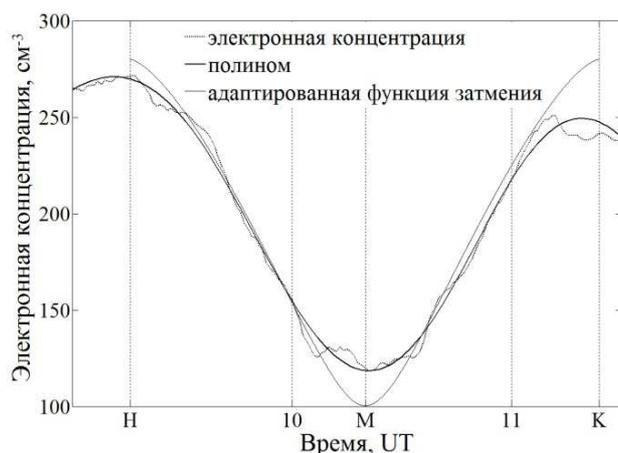


Рис. 4. Профиль электронной концентрации на высоте 68 км (точки), полином 9-й степени (толстая линия) и адаптированная функция затмения (тонкая линия)  
Fig. 4. The electron concentration profile at the altitude of 68 km (dots), the polynomial of the 9th degree (the thick line) and the adapted function of eclipse (the thin line)

Поведение профиля ЭК на высоте 68 км соответствует поведению функции затмения или функции ионизации солнечного излучения за исключением небольшого участка профиля около максимума затмения, когда электронная концентрация перестает уменьшаться и выходит на приблизительно постоянный уровень с небольшим уменьшением около минимума функции затмения. При этом полином и сам профиль ЭК достигают своего минимума через несколько минут после максимума затмения. В данном случае имеется подобие поведения ЭК и потока солнечного излучения, которое теоретически ожидалось и практически регистрировалось, начиная с первых ионосферных наблюдений солнечных затмений.

Как оказалось впоследствии, процессы переноса плазмы оказывают существенное влияние на вид профиля ЭК. В начале 1970-х гг. G. Chimonas, C. Hines [15] предположили, что во время солнечного затмения могут наблюдаться атмосферные гравитационные волны, вызванные сверхзвуковым прохождением лунной тени по поверхности Земли и охлаждением атмосферы из-за уменьшения солнечного излучения в области тени. В последующие годы исследователи получили подтверждение существования подобного явления [16–18]. На рис. 5 показаны профили ЭК на высотах 68 и 90 км. Для высоты 68 км штриховой линией нанесена функция затмения. На рисунке она "привязана" к ЭК. Сплошной линией внизу рисунка показано время СЗ в месте наблюдения, буквами Н, М и К – начало, максимум и конец затмения соответственно. Поведение ЭК на высоте 90 км весьма отличается от поведения функции затмения, что можно объяснить появлением в районе наблюдения АГВ, вызванных СЗ, и перераспределением ЭК в результате процессов переноса плазмы. Очевидно, что в данном случае для высоты 90 км определение ЭКР не представляется возможным. На высоте 68 км поведение электронной концентрации подобно поведению функции затмения, что позволяет рассчитать ЭКР.

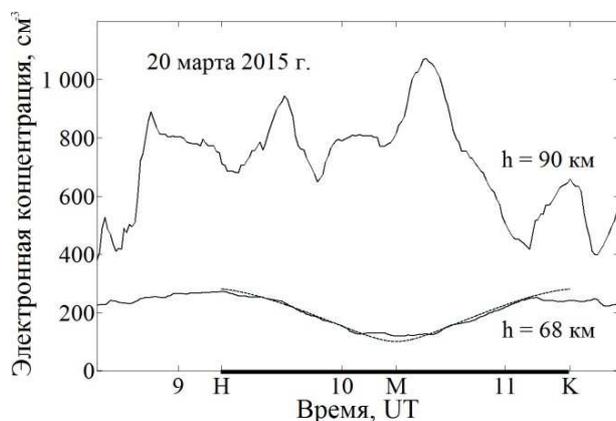


Рис. 5. Профили электронной концентрации 20 марта 2015 г. на высотах 68 и 90 км  
Fig. 5. The electron concentration profiles on March 20, 2015 at the heights of 68 and 90 km

## Результаты и обсуждение

Во время солнечных затмений 11 августа 1999 г., 1 августа 2008 г., 1 июня 2011 г. и 20 марта 2015 г. на установке частичных отражений на радиофизическом полигоне "Туманный" [19–22] были проведены наблюдения реакции нижней ионосферы на солнечные затмения. На основании полученных данных определены экспериментальные профили электронной концентрации на высотах  $D$ -области ионосферы. Анализ этих профилей ЭК позволил найти время релаксации и определить эффективные коэффициенты рекомбинации на нескольких высотах  $D$ -области ионосферы для двух солнечных затмений.

### Затмение 20 марта 2015 г.

Солнечное затмение 20 марта 2015 г. было полным. В пос. Туманный солнечное затмение было частным. Параметры частного затмения в месте наблюдения: начало – в 09:15:8 UT, максимум – в 10:20:06 UT, конец – в 11:23:58 UT; максимальное покрытие диска Солнца Луной составило 85.5 %; высота Солнца над горизонтом в момент наибольшей фазы затмения равна  $20.5^\circ$ . Геомагнитная обстановка в период затмения была слабовозмущенной; значение 3-часового планетарного индекса геомагнитной возмущенности  $Kp$  равно 3.

Двумерная картина распределения электронной концентрации для периода затмения показана на рис. 2; профили электронной концентрации на различных высотах, использованные для расчета ЭКР, – на рис. 6. Точкой на рис. 6 обозначено время максимума затмения, звездочкой – минимум полинома, описывающего поведение профиля электронной концентрации, кружком – минимум электронной концентрации профиля электронной концентрации. При анализе данных наблюдений подобные графики построены для всех высот, но из-за влияния различных факторов, в том числе процессов переноса плазмы, получить значения ЭКР для большинства высот не удалось.

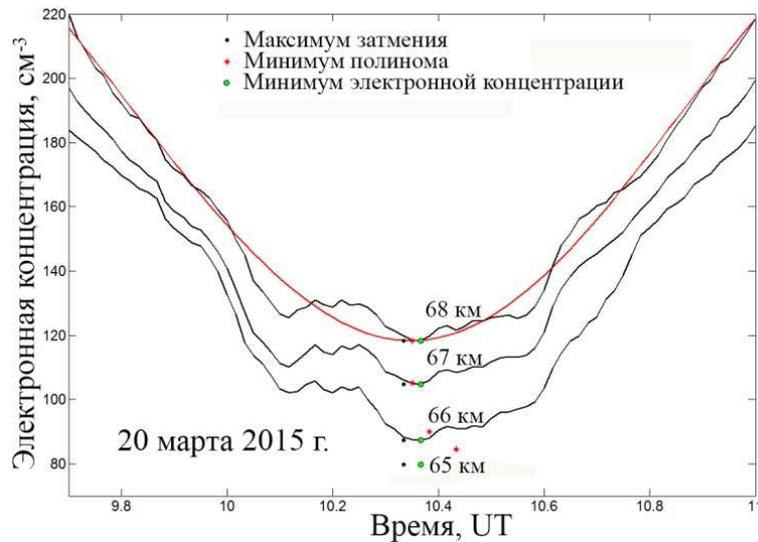


Рис. 6. Профили электронной концентрации  
Fig. 6. The electron concentration profiles

Значения ЭКР рассчитывались из профиля ЭК, полученного в ходе наблюдений. Для этого находилось значение ЭК в минимуме функции скорости образования электронов (на рисунке максимум затмения обозначен точкой). Далее находилось время минимума профиля ЭК (кружок на рис. 6) и рассчитывалось время релаксации, а затем по формуле (7) рассчитывался ЭКР. Из-за того что профили ЭК имеют негладкий вид, для поиска минимума профиля были использованы полиномы, описывающие профиль ЭК (рис. 6, гладкая кривая; см. также рис. 4). Находился минимум полинома (звездочка на рис. 6), и по нему находилось время релаксации и рассчитывался ЭКР. Профили ЭК и полином для высоты 65 км не нарисованы, показаны только контрольные точки. Полученные значения ЭКР приведены в табл. 1. Свойством ЭКР является зависимость от высоты: с увеличением высоты ЭКР уменьшается [1–3]. Данные, полученные с использованием полиномов, показывают рост величины ЭКР с высотой, что явно противоречит теории и экспериментальным наблюдениям. Таким образом, использовать полиномы для нахождения ЭКР необходимо с осторожностью и в нашем случае они не применимы.

В табл. 1 приведены высоты и значения полученных эффективных коэффициентов рекомбинации. Для солнечных затмений 11 августа 1999 г., 1 июня 2011 г. и 1 августа 2008 г. методика оценки ЭКР подобна.

Таблица 1. Эффективные коэффициенты рекомбинации, солнечное затмение 20 марта 2015 г.  
Table 1. Effective recombination coefficients, the solar eclipse of March 20, 2015

Высота, км	Эффективный коэффициент рекомбинации, $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , наблюдение	Эффективный коэффициент рекомбинации, $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , полином
68	$3.6 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-5}$
67	$4.1 \cdot 10^{-5}$	$8.8 \cdot 10^{-5}$
66	$4.9 \cdot 10^{-5}$	$3.3 \cdot 10^{-5}$
65	$5.4 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$

*Затмение 1 июня 2011 г.*

Солнечное затмение 1 июня 2011 г. было частным. Параметры частного затмения в месте наблюдения: начало – в 20:33:49 UT, максимум – в 21:23:17 UT, конец – в 22:12:37 UT; максимальное покрытие диска Солнца Луной составило 49.6 %; высота Солнца над горизонтом в момент наибольшей фазы затмения равна  $1.1^\circ$ . Геомагнитная обстановка была слабозмущенной; *Kp*-индексы за 1 июня 2011 г. равны 3–, 1, 3–, 1+, 2+, 3+, 2, 3–,  $\Sigma = 18$ .

На рис. 7 показано распределение ЭК. Из рисунка видно, что для данного затмения затруднительно выделить участок пониженной электронной концентрации. Это объяснимо, поскольку затмение было в полярную ночь. Солнце находилось практически на горизонте, что существенно уменьшило солнечное ионизирующее излучение в районе наблюдения, при этом сам эффект затмения был выражен неявно, поскольку покрытие диска Солнца Луной было 49.6 %. Рассмотрение профилей ЭК по высотам не выявили профилей, используя которые можно было бы рассчитать ЭКР.

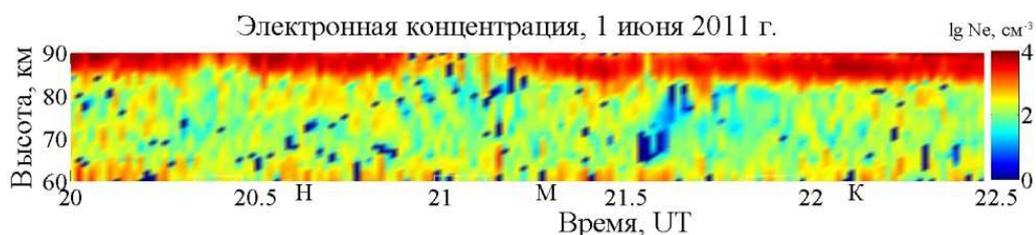


Рис. 7. Распределение электронной концентрации, затмение 1 июня 2011 г.  
Fig. 7. The electron density distribution, June 1, 2011

*Затмение 1 августа 2008 г.*

Солнечное затмение 1 августа 2008 г. было полным. В пос. Туманный затмение было частным. Параметры частного затмения в месте наблюдения: начало – в 08:48:10 UT, максимум – в 09:54:08 UT, конец – в 10:59:28 UT; максимальное покрытие диска Солнца Луной составило 79.1 %; высота Солнца над горизонтом в момент наибольшей фазы затмения равна  $38.8^\circ$ . Геомагнитная обстановка 1 августа 2008 г. была спокойной; *Kp*-индексы за сутки равны 1–, 1–, 0+, 0+, 1, 1, 2–, 1+,  $\Sigma = 7$ .

На рис. 8 приведена картина распределения электронной концентрации в период затмения. Буквы Н, М и К означают начало, максимум и конец затмения соответственно.

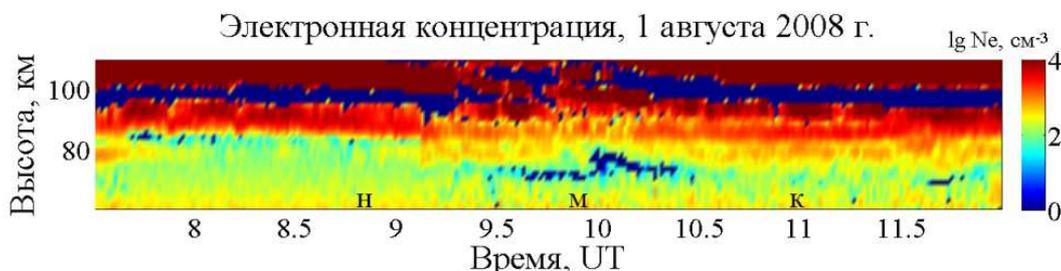


Рис. 8. Распределение электронной концентрации, затмение 1 августа 2008 г.  
Fig. 8. The electron density distribution, August 1, 2008

На рис. 9 показаны профили электронной концентрации, использованные для расчета ЭКР. Буквой М обозначен максимум солнечного затмения, точками – минимумы электронной концентрации. Подобные графики построены для всех высот, но из-за влияния процессов переноса плазмы, в том числе волновых

возмущений, получить значения ЭКР для большинства высот не удалось. В табл. 2 приведены высоты и значения полученных эффективных коэффициентов рекомбинации.

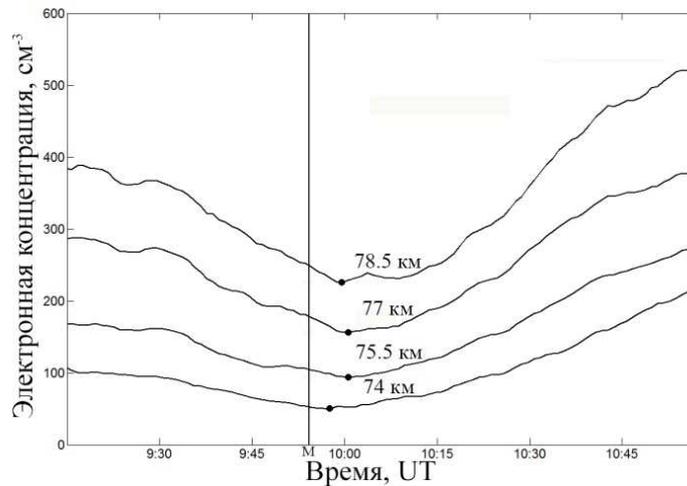


Рис. 9. Профили электронной концентрации, затмение 1 августа 2008 г.:  
 М – максимум затмения, точки – минимум электронной концентрации  
 Fig. 9. The electron concentration profiles, the solar eclipse of 1 August, 2008:  
 M – maximum eclipse, points – the electron concentration minimum

Таблица 2. Эффективные коэффициенты рекомбинации, солнечное затмение 1 августа 2008 г.  
 Table 2. Effective recombination coefficients, the solar eclipse of August 1, 2008

Высота, км	Эффективный коэффициент рекомбинации, $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
78.5	$6.6 \cdot 10^{-6}$
77	$8.1 \cdot 10^{-6}$
75.5	$1.3 \cdot 10^{-5}$
74	$4.7 \cdot 10^{-5}$

*Затмение 11 августа 1999 г.*

Параметры затмения в пос. Туманный: начало – в 9:57:43 UT; максимум – в 10:54:26 UT; конец – в 11:50:17 UT. Максимальное покрытие диска Солнца Луной составило 32.7 %; высота Солнца над горизонтом в момент наибольшей фазы затмения равна 35.1°. Геомагнитная обстановка в период затмения была спокойной; Kp-индексы за сутки равны 3-, 2, 1-, 1, 1, 1, 2+, 2-,  $\Sigma = 12.3$ .

На рис. 10 приведено распределение электронной концентрации во время солнечного затмения. Рассмотрение профилей ЭК по высотам не выявило профилей, используя которые, можно было бы рассчитать ЭКР. Высота Солнца над горизонтом была относительно большой (35.1°), но из-за того что в районе наблюдения покрытие диска Солнца Луной составило 32.7 %, изменение потока солнечного излучения оказало слабое воздействие на поведение электронной концентрации во время затмения.

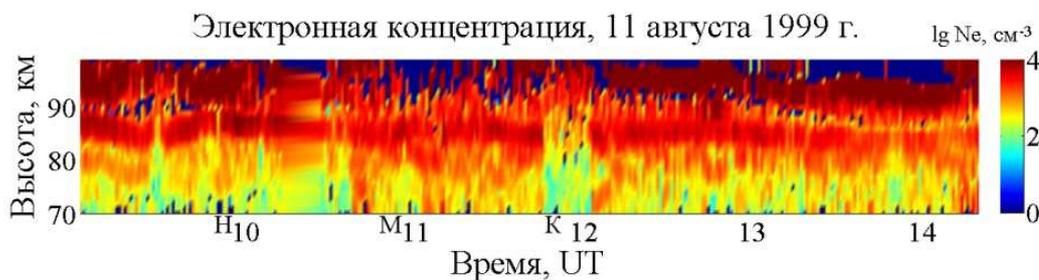


Рис. 10. Распределение электронной концентрации, солнечное затмение 11 августа 1999 г.  
 Fig. 10. The electron density distribution, the solar eclipse of August 11, 1999

### Заключение

Наблюдение за ионосферой во время солнечных затмений на радаре частичных отражений р.ф.п. "Туманный" позволило рассчитать значения эффективных коэффициентов рекомбинации для высот  $D$ -области высокоширотной ионосферы во время затмений 1 августа 2008 г. и 20 марта 2015 г. Слабый эффект воздействия солнечного излучения на электронную концентрацию во время солнечных затмений 11 августа 1999 г. и 1 июня 2011 г. был вызван, вероятно, относительно небольшим покрытием диска Солнца Луной (32.7 % 11 августа 1999 г. и 49.6 % 1 июня 2011 г.) и из-за небольшой высоты Солнца во время затмения (1.1° 1 июня 2011 г.). Перенос плазмы во время затмений, в том числе из-за волновых процессов, существенно влияет на профиль электронной концентрации на высотах  $D$ -области ионосферы в высоких широтах, что затрудняет определение ЭКР. При благоприятных условиях наблюдение за поведением электронной концентрации во время солнечного затмения позволяет получить значения эффективного коэффициента рекомбинации.

### Благодарности

Автор выражает благодарность Е. Б. Васильеву за подготовку и проведение наблюдений, О. Ф. Оглоблиной, В. А. Терещенко – за обработку первичных данных, а Ю. Н. Куликову – за обсуждение материала при подготовке статьи.

### Библиографический список

1. Данилов А. Д. Популярная аэрономия. Л. : Гидрометеиздат, 1989. 230 с.
2. Osepian A. P., Kirkwood S., Dalin P., Tereshchenko V.  $D$ -region electron density and effective recombination coefficients during twilight – experimental data and modelling during solar proton events // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 3713–3724.
3. Данилов А. Д., Иванов-Холодный Г. С. Исследование ионно-молекулярных реакций и диссоциативной рекомбинации в верхней атмосфере и в лаборатории // *Успехи физических наук.* 1965. Т. 85, вып. 2. С. 259–296.
4. Ратклиф Дж. А., Уикс К. Ионосфера // *Физика верхней атмосферы* / под ред. Дж. А. Ратклифа. М. : Физматгиз, 1963. С. 339–418.
5. Appleton E. V. A note on the "sluggishness" of the ionosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1953. V. 3, N 5. P. 282–284.
6. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М. : Наука, 1972. 564 с.
7. Иванов В. А., Иванов Д. В., Рябова Н. В., Рябова М. И. Исследование особенностей распространения высокочастотных сигналов на наклонных и NVIS радиопроцелиях в периоды солнечных затмений // *Вестник ННГУ. Радиофизика.* 2012. № 2 (1). С. 59–65.
8. *Астрономический ежегодник на 2015 год.* СПб. : ИПА РАН, 2014. 683 с.
9. Gardner F. F., Pawsey J. L. Study of the ionospheric  $D$ -region using partial reflections // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1953. V. 3, N 6. P. 321–344.
10. Belrose J. S., Burke M. J. Study of the lower ionosphere using partial reflection. I. Experimental technique and methods of analysis // *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69, N 13. P. 2799–2818.
11. Coyne T. N. R., Belrose J. S. The diurnal and seasonal variation of electron densities in the midlatitude  $D$ -region under quiet condition // *Radio Sci.* 1972. V. 7, N 1. P. 163–174.
12. Рапопорт З. Ц. Исследования области  $D$  ионосферы методом частичных отражений // *Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы.* М. : ВИНТИ, 1972. Т. 1. С. 172–189.
13. Беликович В. В., Вяхирев В. Д., Калинин Е. Е. Исследование ионосферы методом частичных отражений // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2004. Т. 44, № 2. С. 189–194.
14. Терещенко В. Д., Васильев Е. Б., Овчинников Н. А., Попов А. А. Средневолновый радиолокатор Полярного геофизического института для исследования нижней ионосферы // *Техника и методика геофизического эксперимента.* Апатиты : КНЦ РАН, 2003. С. 37–46.
15. Chimonas G., Hines C. O. Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75, N 4. P. 875.
16. Arendt P. R. Ionosphere-gravity wave interactions during the March 7, 1970, solar eclipse // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76, N 19. P. 4695–4697.
17. Hanuise C., Broche P., Ogubazghi G. HF Doppler observations of gravity waves during the 16 February 1980 solar eclipse // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1982. V. 44, N 11. P. 609–616.
18. Šauli P. S., Roux G., Abry P., Boška L. Acoustic-gravity waves during solar eclipses: detection, characterization and modeling using wavelet transforms // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2007. V. 69, N 17–18. P. 2465–2484.
19. Tereshchenko V. D., Vasiljev E. B., Yakimov M. V., Tereshchenko V. A., Oglloblina O. F. The radar observations of the lower polar ionosphere during the solar eclipse of 1999 August 11 // *Proc. of the 24th Annual*

Seminar on Physics Auroral Phenomena, Apatity, Russia, 27 February – 2 March, 2001. Apatity : KSC RAS, PGI, 2001. P. 128–130.

20. Tereshchenko V. D., Vasiljev E. B., Tereshchenko V. A., Ogloblina O. F., Cherniakov S. M. About the polar lower ionosphere behavior during the solar eclipse on 1 August 2008 // Proc. of the XXXII Annual Seminar on Physics of Auroral Phenomena, Apatity, Russia, 3–6 March, 2009. Apatity : KSC RAS, PGI, 2009. P. 185–188.

21. Tereshchenko V. D., Tereshchenko V. A., Cherniakov S. M., Ogloblina O. F. Experimental researches of wave disturbances in the polar lower ionosphere during the partial solar eclipse on 1 June 2011 // Physics of Auroral Phenomena, Proc. of the XXXV Annual Seminar, 28 February – 2 March, 2012, Apatity, Russia. Apatity : KSC RAS, PGI, 2012. P. 115–118.

22. Черняков С. М., Терешенко В. А., Оглоблина О. Ф., Васильев Е. Б., Гомонов А. Д. Полное солнечное затмение 20 марта 2015 г.: волновые эффекты в нижней ионосфере высоких широт // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды : мат. IV Всерос. науч. конф. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. С. 671–676.

## References

1. Danilov A. D. Populyarnaya aeronomiya [Popular aeronomy]. L. : Gidrometeoizdat, 1989. 230 p.
2. Osepian A. P., Kirkwood S., Dalin P., Tereshchenko V. D-region electron density and effective recombination coefficients during twilight – experimental data and modelling during solar proton events // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 3713–3724.
3. Danilov A. D., Ivanov-Holodnyi G. S. Issledovanie ionno-molekulyarnykh reaktsiy i dissotsiativnoy rekombinatsii v verhney atmosfere i v laboratorii [Research on ion-molecule reactions and dissociative recombination in the upper atmosphere and in the laboratory] // Uspehi fizicheskikh nauk. 1965. V. 85, vyp. 2. P. 259–296.
4. Ratklif Dzh. A., Uiks K. Ionosfera [Ionosphere] // Fizika verhney atmosfery / pod red. Dzh. A. Ratklifa. M. : Fizmatgiz, 1963. P. 339–418.
5. Appleton E. V. A note on the "sluggishness" of the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1953. V. 3, N 5. P. 282–284.
6. Alpert Ya. L. Rasprostranenie elektromagnitnykh voln i ionosfera [Spreading of electromagnetic waves and ionosphere]. M. : Nauka, 1972. 564 p.
7. Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Ryabova M. I. Issledovanie osobennostey rasprostraneniya vysokochastotnykh signalov na naklonnykh i NVIS radiolinnykh v periody solnechnykh zatmeniy [Researches of high-frequency signals spreading features along oblique and NVIS radio canals during the periods of solar eclipses] // Vestnik NNGU. Radiofizika. 2012. N 2 (1). P. 59–65.
8. Astronomicheskiy ezhegodnik na 2015 god [Astronomical Yearbook 2015]. SPb. : IPA RAN, 2014. 683 p.
9. Gardner F. F., Pawsey J. L. Study of the ionospheric D-region using partial reflections // J. Atmos. Terr. Phys. 1953. V. 3, N 6. P. 321–344.
10. Belrose J. S., Burke M. J. Study of the lower ionosphere using partial reflection. I. Experimental technique and methods of analysis // J. Geophys. Res. 1964. V. 69, N 13. P. 2799–2818.
11. Coyne T. N. R., Belrose J. S. The diurnal and seasonal variation of electron densities in the midlatitude D-region under quiet condition // Radio Sci. 1972. V. 7, N 1. P. 163–174.
12. Rapoport Z. Ts. Issledovaniya oblasti D ionosfery metodom chastichnykh otrazheniy [Researches of the D-region of the ionosphere by the method of partial reflections] // Itogi nauki i tehniki. Ser. Geomagnetizm i vysokie sloi atmosfery. M. : VINITI, 1972. V. 1. P. 172–189.
13. Belikov V. V., Vyahirev V. D., Kalinina E. E. Issledovanie ionosfery metodom chastichnykh otrazheniy [Research of the ionosphere by the method of partial reflections] // Geomagnetizm i aeronomiya. 2004. V. 44, N 2. P. 189–194.
14. Tereshchenko V. D., Vasilev E. B., Ovchinnikov N. A., Popov A. A. Srednevolnovyi radiolokator Polyarnogo geofizicheskogo instituta dlya issledovaniya nizhney ionosfery [Medium wave radar of the Polar Geophysical Institute for research of the lower ionosphere] // Tehnika i metodika geofizicheskogo eksperimenta. Apatity : KNTs RAN, 2003. P. 37–46.
15. Chimonas G., Hines C. O. Atmospheric gravity waves induced by a solar eclipse // J. Geophys. Res. 1970. V. 75, N 4. P. 875.
16. Arendt P. R. Ionosphere-gravity wave interactions during the March 7, 1970, solar eclipse // J. Geophys. Res. 1971. V. 76, N 19. P. 4695–4697.
17. Hanuise C., Broche P., Ogubazghi G. HF Doppler observations of gravity waves during the 16 February 1980 solar eclipse // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, N 11. P. 609–616.
18. Šauli P. S., Roux G., Abry P., Boška L. Acoustic-gravity waves during solar eclipses: detection, characterization and modeling using wavelet transforms // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2007. V. 69, N 17–18. P. 2465–2484.

19. Tereshchenko V. D., Vasiljev E. B., Yakimov M. V., Tereshchenko V. A., Ogloblina O. F. The radar observations of the lower polar ionosphere during the solar eclipse of 1999 August 11 // Proc. of the 24th Annual Seminar on Physics Auroral Phenomena, Apatity, Russia, 27 February – 2 March, 2001. Apatity : KSC RAS, PGI, 2001. P. 128–130.

20. Tereshchenko V. D., Vasiljev E. B., Tereshchenko V. A., Ogloblina O. F., Cherniakov S. M. About the polar lower ionosphere behavior during the solar eclipse on 1 August 2008 // Proc. of the XXXII Annual Seminar on Physics of Auroral Phenomena, Apatity, Russia, 3–6 March, 2009. Apatity : KSC RAS, PGI, 2009. P. 185–188.

21. Tereshchenko V. D., Tereshchenko V. A., Cherniakov S. M., Ogloblina O. F. Experimental researches of wave disturbances in the polar lower ionosphere during the partial solar eclipse on 1 June 2011 // Physics of Auroral Phenomena, Proc. of the XXXV Annual Seminar, 28 February – 2 March, 2012, Apatity, Russia. Apatity : KSC RAS, PGI, 2012. P. 115–118.

22. Chernyakov S. M., Tereshchenko V. A., Ogloblina O. F., Vasilev E. B., Gomonov A. D. Polnoe solnechnoe zatmenie 20 marta 2015 g.: volnovye efekty v nizhney ionosfere vysokih shirot [The 20 March 2015 total solar eclipse: wave effects in the lower ionosphere of high latitudes] // Problemy voenno-prikladnoy geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoy sredy : mat. IV Vseros. nauch. konf. SPb. : VKA im. A. F. Mozhaiskogo, 2016. P. 671–676.

#### **Сведения об авторе**

**Черняков Сергей Михайлович** – ул. Халтурина, 15, г. Мурманск, Россия, 183010; Полярный геофизический институт, науч. сотрудник; e-mail: sergeich@pgi.ru

**Chernyakov S. M.** – 15, Khalturina Str., Murmansk, Russia, 183010; Polar Geophysical Institute, Researcher; e-mail: sergeich@pgi.ru

S. M. Chernyakov

**Experimental estimation of effective recombination coefficients  
in the *D*-region ionosphere at high latitudes during solar eclipses  
by the method of partial reflections**

The photochemical theory of processes in the lower ionosphere is very complicated and up to now it is not completely developed. Therefore introduction of the effective coefficients determining the total speed of several important reactions has been widely adopted when modeling the *D*-region of the ionosphere. Experimental opportunities for obtaining effective recombination coefficients are rather limited. One of the methods to estimate effective recombination coefficients uses the phenomenon of a solar eclipse. The basis of this method is the idea of Appleton about similarity of the behavior of the linear inductive circuit and variations of the electron concentration in the ionosphere on a fixed height in the absence of the transport processes, the change in the rate of formation of electrons in time and the disappearance of free electrons due to recombination. By analogy with the time constant of the electric circuit Appleton called the reaction of the ionosphere on the process of ionization in the ionosphere as "sluggishness" with a characteristic time constant  $\tau$ , which is also called the "relaxation time" or "time constant of the ionosphere". During 11 August 1999, 1 August 2008, 11 June 2011, 20 March 2015 solar eclipses at the partial reflection facility of the observatory "Tumanny" (69.0N, 35.7E) observations of the amplitudes of reflections of ordinary and extraordinary waves have been carried out. Using the obtained data the two-dimensional (time, height) distribution of the electron density  $n_e$  at altitudes of the *D*-region ionosphere has been calculated. This has made it possible to obtain the behavior of the electron concentration in time at selected altitudes (temporal profiles of electron density at selected altitudes). Using the obtained experimental profiles, the effective recombination coefficients on the heights of the *D*-region ionosphere have been evaluated. Transport processes of plasma (for example, propagation of acoustic-gravity waves, vertical motion) during eclipses have influenced on the behavior of the temporal profiles of the electron concentration at altitudes of the *D*-region ionosphere. This has led to the fact that on some heights of the *D*-region ionosphere determination of effective recombination coefficient became impossible.

**Key words:** lower ionosphere, solar eclipse, effective recombination coefficient.