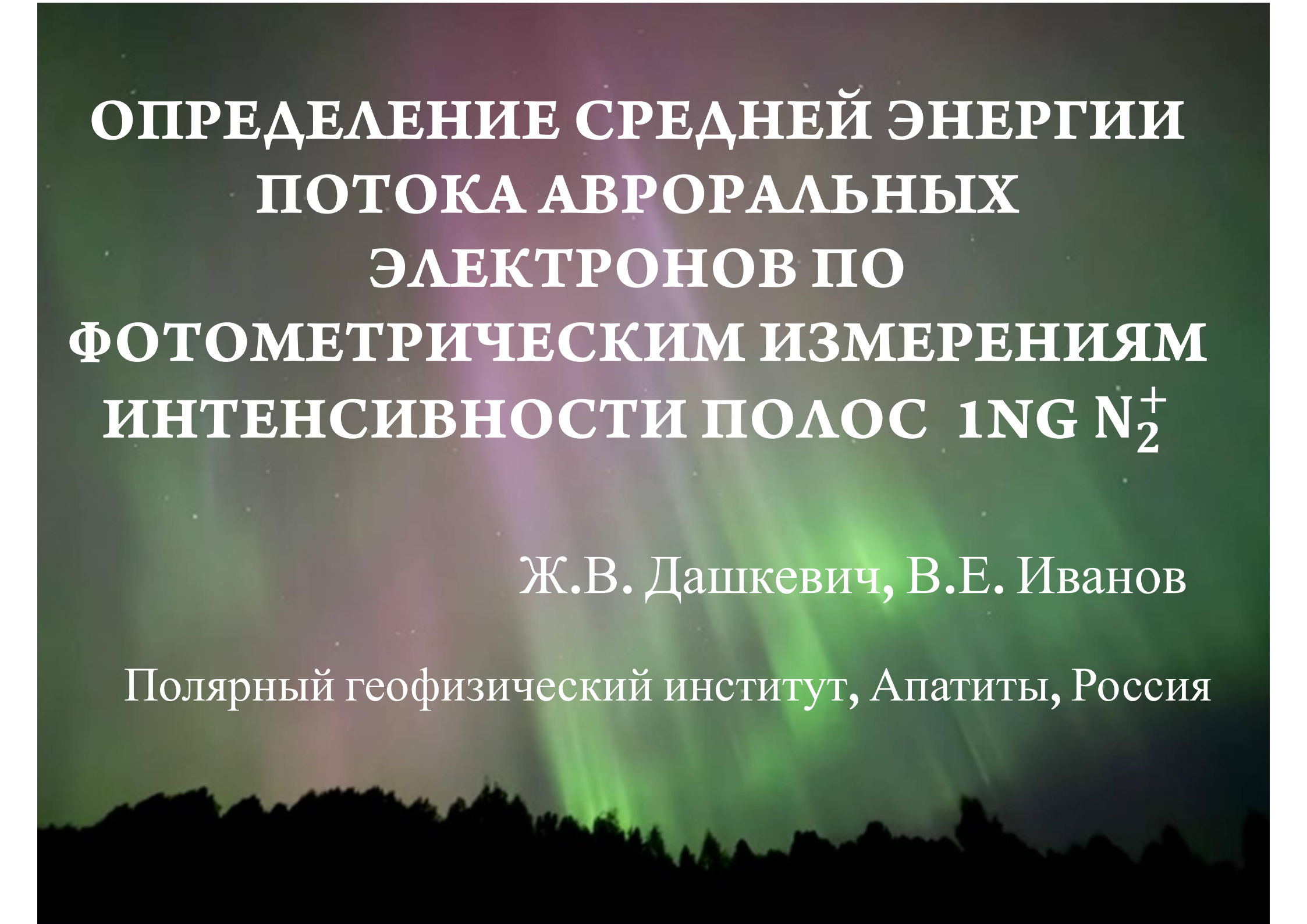


The background of the slide is a photograph of the aurora borealis (northern lights) in a dark night sky. The aurora appears as vibrant green and purple streaks and curtains of light. At the bottom of the image, the dark silhouette of a forest or treeline is visible against the glowing sky.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛОС 1NG N_2^+

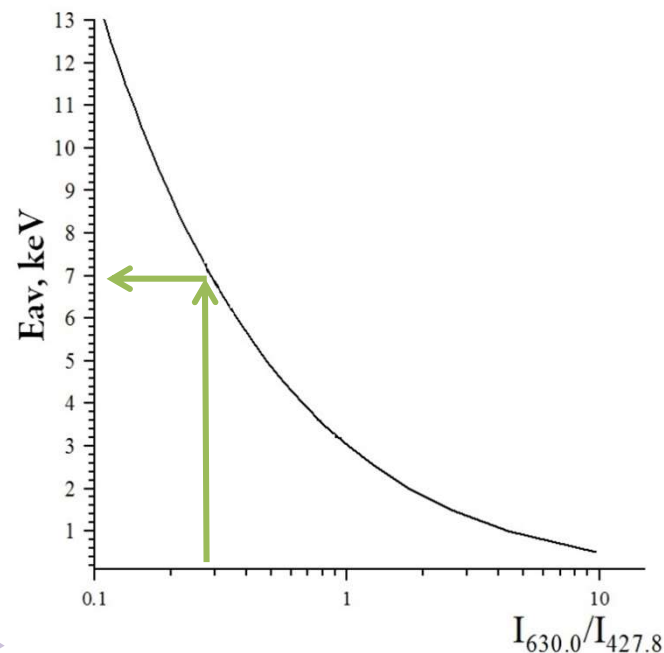
Ж.В. Дашкевич, В.Е. Иванов

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

Высыпавшиеся электроны являются основными источниками энергии в ионосфере во время полярных сияний. Поэтому оценка параметров потока электронов в полярных сияниях является актуальной задачей при диагностике состояния ионосферной плазмы в полярном регионе. В докладе представлены методики оценки E_{av} средней энергии потока авроральных электронов, основанные на фотометрических наблюдениях только одной эмиссии полярного сияния- полосы первой отрицательной системы иона молекулярного азота.

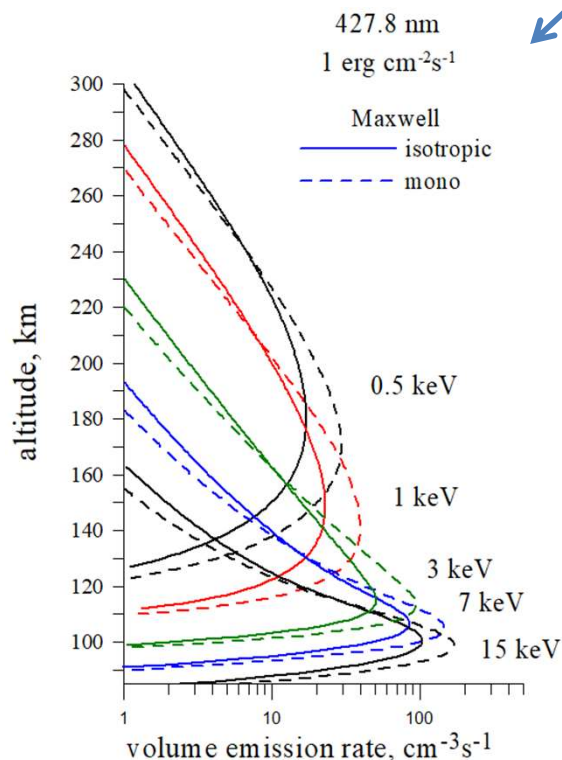
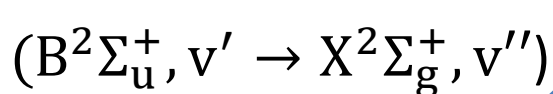
Традиционный метод

Традиционный подход в оценке средней энергии по фотометрическим данным основан на использовании зависимости отношения интенсивностей двух эмиссий полярных сияний от средней энергии потока авроральных электронов. Выбранные эмиссии должны характеризоваться различной степенью деактивации с увеличением глубины проникновения электронов в атмосферу. При использовании наземных наблюдений обычно рассматриваются отношения интенсивностей эмиссий $\lambda 630.0$ нм и $\lambda 427.8$ нм.



1. Оценка средней энергии с использованием интенсивности излучения 427.8 нм

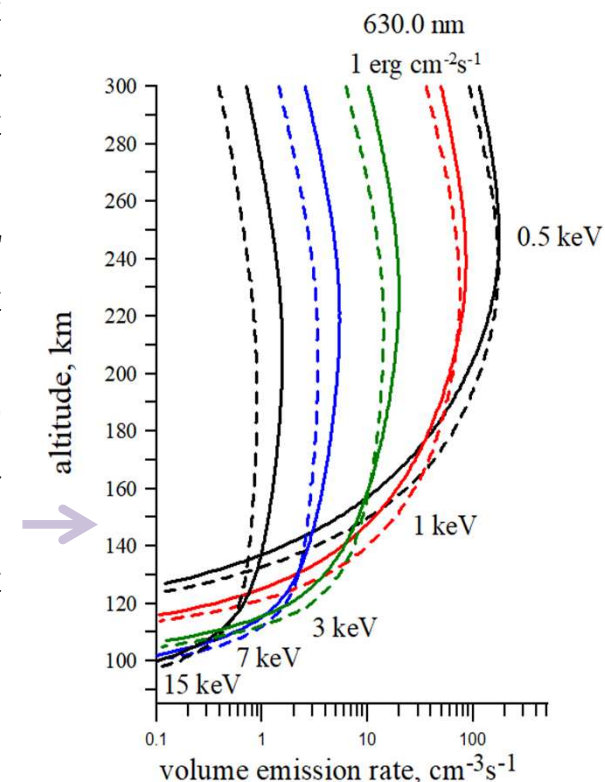
1NG N_2^+



Излучение с длиной волны $\lambda 427.8$ нм является одной из полос первой отрицательной системы иона молекулярного азота 1NG N_2^+ , возникающей в результате переходов $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$. Время жизни состояния $B^2\Sigma_u^+$ составляет около 10^{-7} с. Столкновительной деактивацией состояния $B^2\Sigma_u^+$ можно пренебречь, считая, что оно полностью гасится за счет радиационного переноса энергии.

Излучение на длине волны $\lambda 630,0$ нм возникает в результате радиационного перехода в атоме кислорода $O(^1D \rightarrow ^3P)$. Поскольку 1D -состояние атомарного кислорода является метастабильным (время жизни 110 с), оно подвержено деактивации, степень которой возрастает с увеличением глубины проникновения авроральных электронов в атмосферу.

$O(^1D \rightarrow ^3P)$

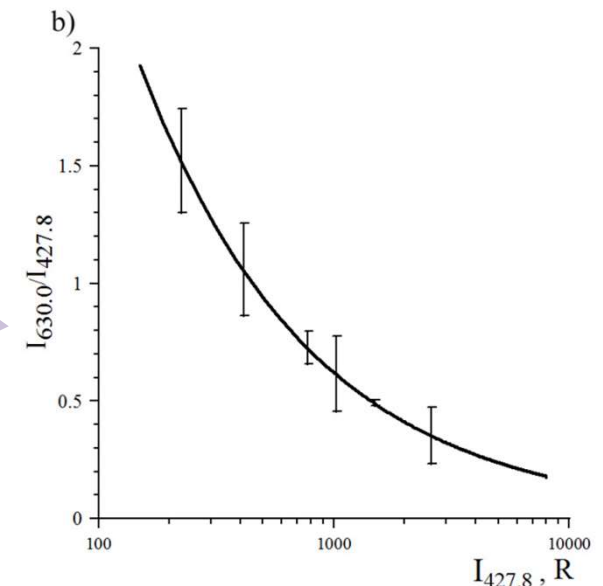
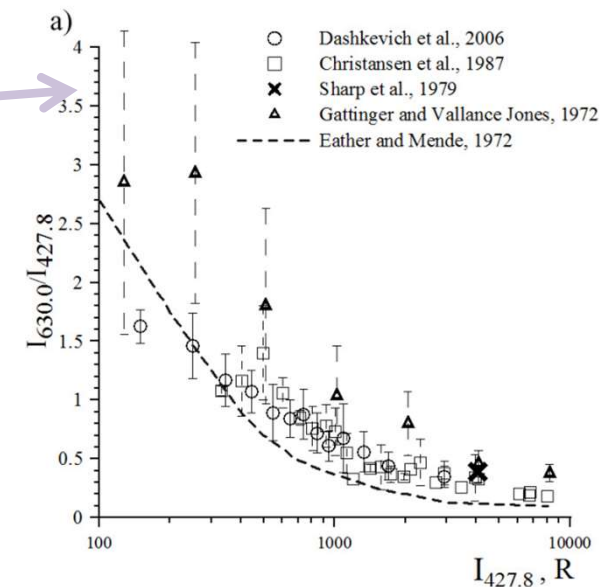


Поскольку глубина проникновения авроральных электронов зависит от средней энергии электронного потока, возникает зависимость отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ от $E_{ср}$.

Экспериментальная зависимость отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ от интенсивности излучения $\lambda 427.8$ нм

Предлагаемая методика оценки Еср основана на экспериментальной зависимости отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ от интенсивности эмиссии $\lambda 427.8$ нм. Из рисунка видно, что это отношение демонстрирует непрерывное уменьшение с увеличением интенсивности эмиссии $\lambda 427.8$ нм. Однако абсолютные значения отношения интенсивностей демонстрируют значительный разброс. Мы выбрали эксперименты с аналогичными условиями наблюдения: наземные наблюдения с помощью фотометров, полуночный сектор аврорального овала [Christensen et al., 1987] и [Дашкевич и др., 2006]. Также результаты ракетного эксперимента [Sharp et al., 1979] согласуются с этими наземными наблюдениями. В результате была получена усредненная кривая экспериментальной зависимости $I_{630.0}/I_{427.8}$ от интенсивности эмиссии $\lambda 427.8$ нм.

Отношение $I_{630.0}/I_{427.8}$ слабо зависит от величины потока высыпавшихся электронов. Можно предположить, что увеличение интенсивности излучения $\lambda 427.8$ нм в полярных сияниях в основном определяется увеличением средней энергии авроральных электронов.



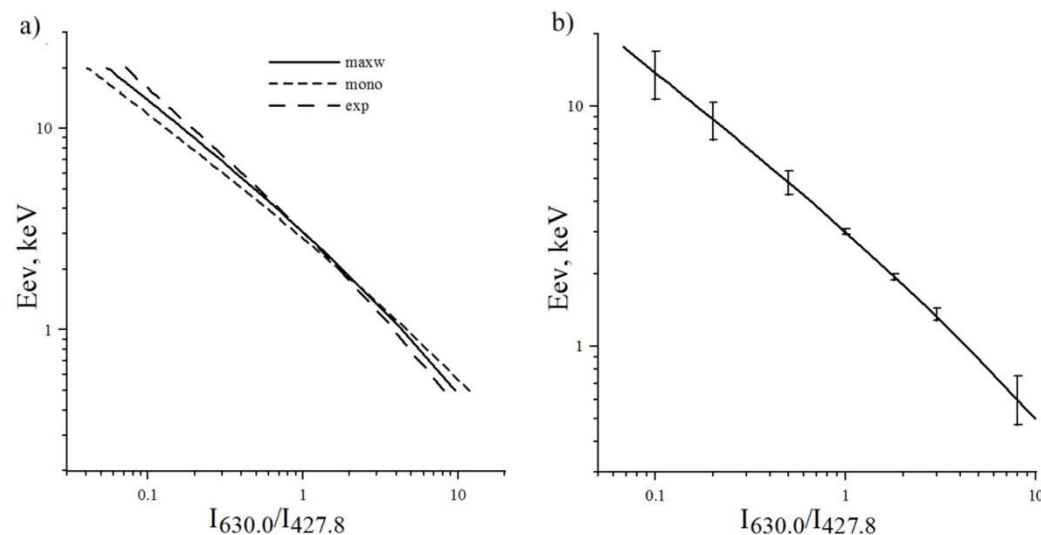
Влияние различных факторов на зависимость средней энергии электронного потока от отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$

Численное моделирование зависимости E_{sr} от отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ в полярных электронах полярных сияний было проведено с использованием нестационарной модели полярной ионосферы, описывающей инициированные потоками авроральных электронов диссипативные процессы в ионосферной плазме [Дашкевич и др., 2017]. В качестве базовой нейтральной модели атмосферы использовалась модель MSIS-90.

1) Влияние формы спектра полярных электронов :

Было проведено исследование влияния формы энергетического спектра авроральных электронов на отношение интенсивностей излучения для трех типов распределений: **Maxwellian**, **exponential** и **monoenergetic**, суперпозиция которых хорошо описывает энергетические спектры авроральных электронов, ответственных за образование дуг, полос и диффузных свечений полярных сияний..

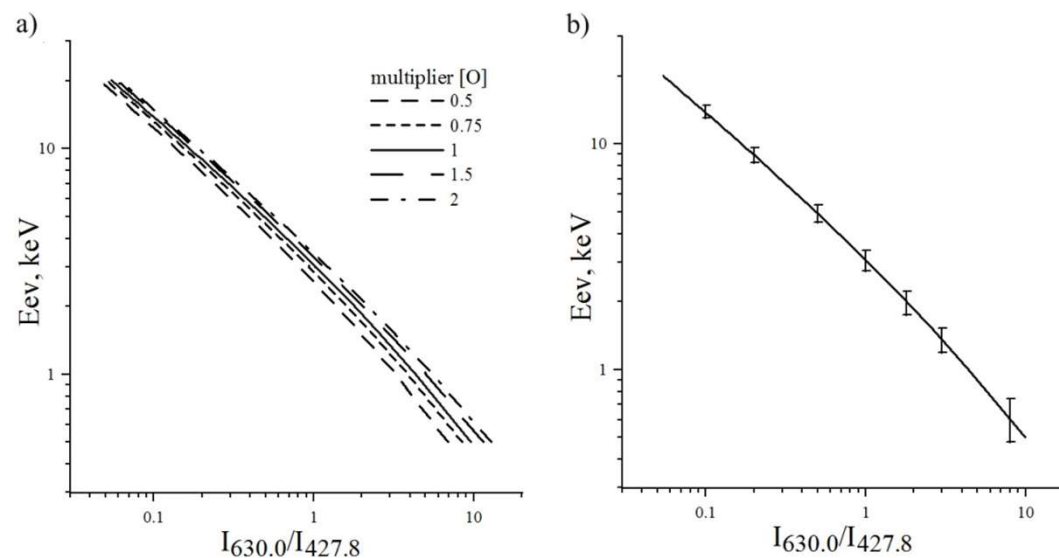
Рисунок показывает, что E_{sr} значительно изменяется с увеличением отношения, но не демонстрирует сильных изменений в зависимости от формы энергетического спектра авроральных электронов. Усредненная кривая зависимости средней энергии от отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ показывает, что стандартные отклонения находятся в диапазоне от 3 до 20%.



2) Влияние нейтральной атмосферы

Влияние модели нейтральной атмосферы на кривую зависимости $E_{\text{ср}}$ от отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ может быть реализовано через атомарный кислород, являющийся источником излучения на длине волны 630.0 нм. В работах [Shepherd and Gerdjikova, 1988] и [Gattinger et al., 1996] был сделан вывод, что наблюдаемая в экспериментах изменчивость отношения $I_{557.7}/I_{427.8}$ может быть объяснена изменениями концентрации атомарного кислорода в диапазоне $0,5\text{--}2[\text{O}]\text{MSIS}$. Следует отметить, что этот диапазон концентраций атомарного кислорода соответствует модели нейтральной атмосферы MSIS-90 для различных уровней солнечной и геомагнитной активности.

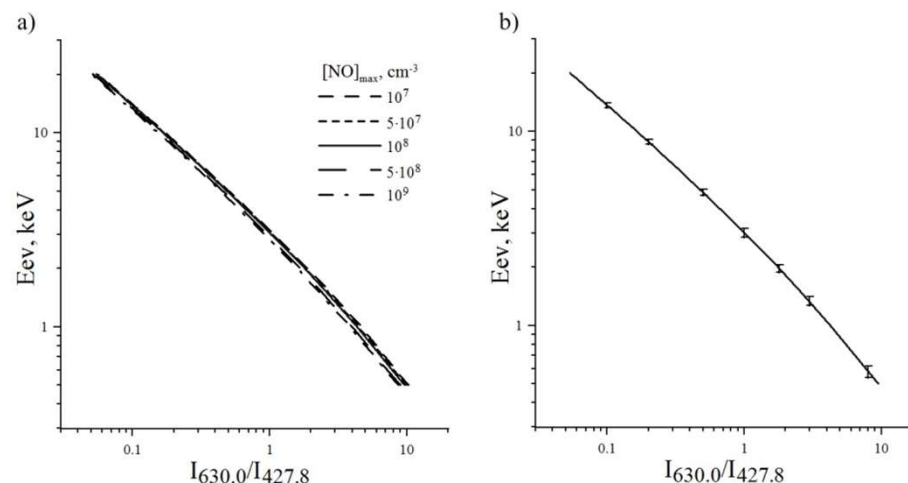
На рисунке показано, что значения $E_{\text{ср}}$, соответствующие различным значениям концентрации атомарного кислорода, близки друг к другу. Усредненная кривая зависимости $E_{\text{ср}}$ от $I_{630.0}/I_{427.8}$ демонстрирует, что стандартные отклонения не превышают 20%.



3) Влияние физико-химических реакций

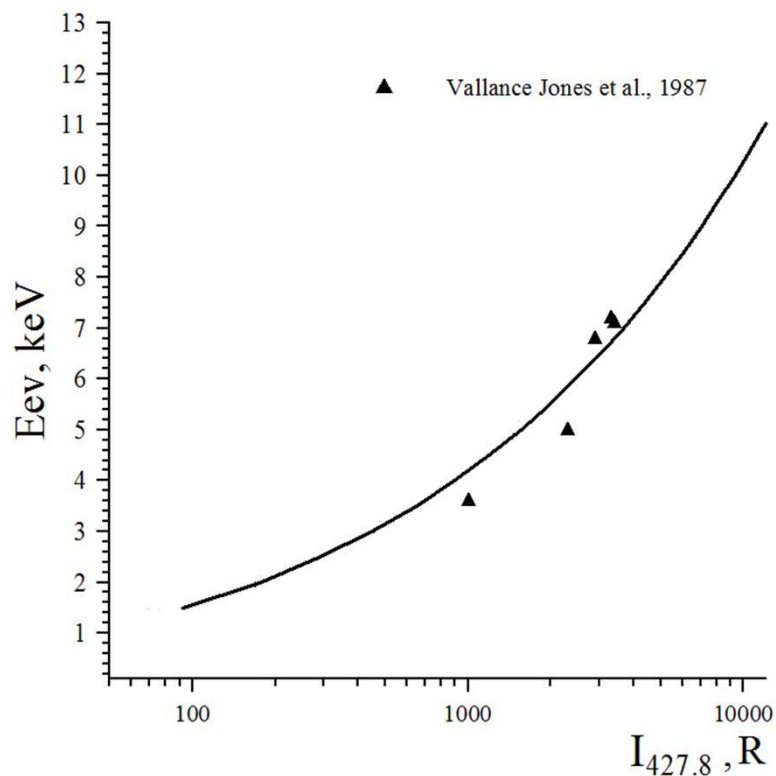
Влияние физико-химических процессов на зависимость $E_{\text{ср}}$ от отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ реализуется через окись азота NO. Окись азота является гасителем иона молекулярного кислорода O_2^+ , что приводит к уменьшению вклада реакции диссоциативной рекомбинации $O_2^+ + e_{\text{th}} \rightarrow O(^1D) + O(^1S)$ в возбуждение 1D состояния атомарного кислорода, а также к уменьшению вклада в возбуждение 1D -состояния за счет радиационного перехода $O(^1S) \rightarrow O(^1D) + h\nu$.

На рисунке показаны зависимости средней энергии потока высыпавшихся электронов с максвелловским распределением энергии от концентраций окиси азота $[NO]_{\text{max}}$, лежащих в диапазоне $10^7 \div 10^9 \text{ см}^{-3}$, что соответствует наблюдаемому в экспериментах диапазону. Видно, что изменения исследуемой кривой незначительны. Вертикальные линии соответствуют стандартным отклонениям, которые не превышают 7%.



Форма энергетического спектра электронов, модель нейтральной атмосферы и концентрация окиси азота не оказывают существенного влияния на кривую зависимости средней энергии $E_{\text{ср}}$ от отношения интенсивностей $I_{630.0}/I_{427.8}$. Отклонения среднего значения $E_{\text{ср}}$ не превышают 20%.

Зависимость между средней энергией потока электронов и интенсивностью излучения $\lambda 427.8$ нм



С учетом экспериментальной зависимости отношения интенсивностей $I_{630.0}/I_{427.8}$ от интенсивности излучения $\lambda 427.8$ нм и смоделированной зависимости средней энергии от отношения интенсивностей, можно установить связь между E_{cp} и интенсивностью излучения $\lambda 427.8$:

$$E_{cp} = 0.251 \times (I_{427.8})^{0.405}$$

Этот метод оценки средней энергии может быть использован при разработке оперативной диагностики и прогнозировании состояния ионосферной плазмы в полярной авроральной области.

2. Оценка средней энергии с использованием высоты максимума излучения 427.8 нм

Из-за малого времени жизни $B^2\Sigma_u^+$ терма ($\sim 10^{-7}$ сек) можно полагать, что его гашение происходит благодаря радиационным переходам на терм $X^2\Sigma_g^+$. В условиях фотохимического равновесия концентрация иона N_2^+ ($B^2\Sigma_u^+, v' = 0$) будет определяться из стационарного уравнения баланса:

Уравнение баланса:

$$0 = Q_{v'}(h) - \sum_{v''} A_{v'v''} [N_2^+(B^2\Sigma_u^+, v' = 0), h]$$

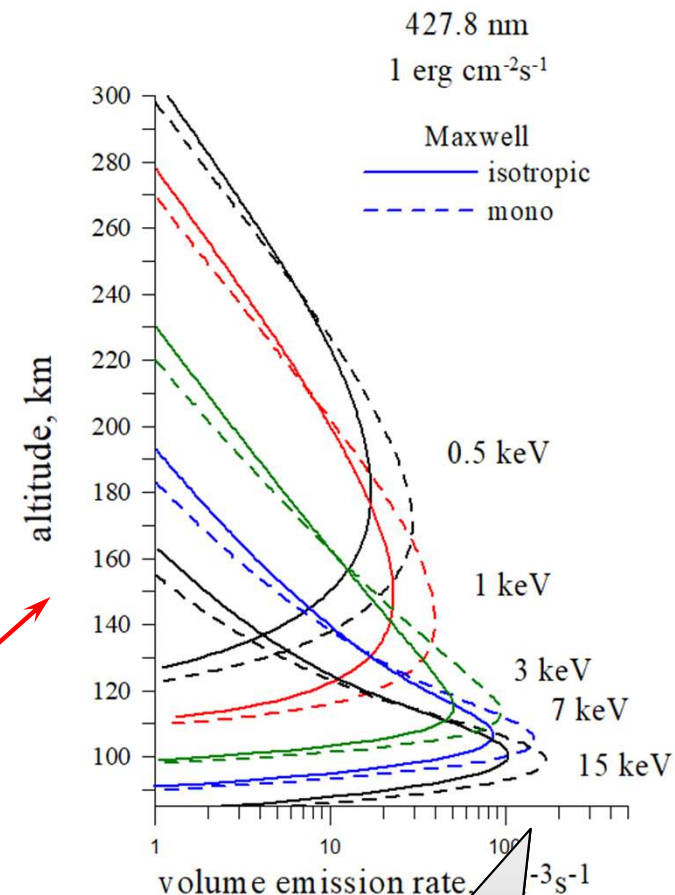
Объемная интенсивность эмиссии 1NG N_2^+ :

$$\eta_{v'v''}(h) = \frac{A_{v'v''}}{\sum_{v''} A_{v'v''}} Q_{v'}(h)$$

вероятность перехода
скорость возбуждения

$$Q_{v'}(h) = P_B(h) \frac{q_{v'}}{\varepsilon_B} W(E, h)$$

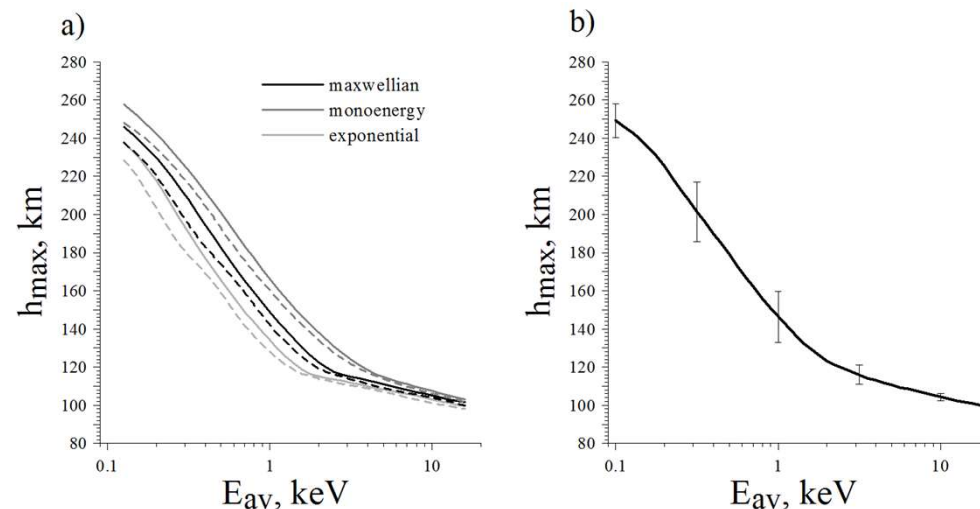
энергетическая цена возбуждения
выделившееся энергия



Высотный профиль интенсивности повторяет высотный профиль выделившейся энергии

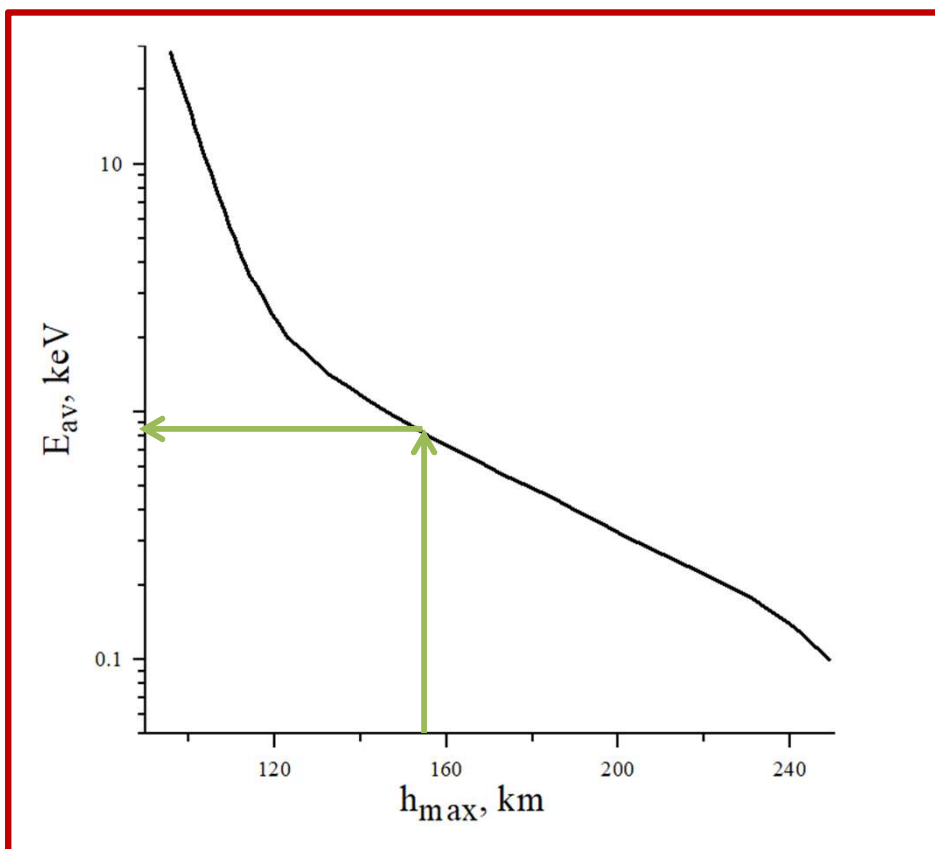
Высота максимума интенсивности $h_{\max}$ равна высоте максимума энерговыделения в атмосфере при прохождении электронов через атмосферу

Моделирование показывает, что высота максимума $h_{\max}$ слабо зависит от типа энергетического спектра и распределения по углу наклона начального потока выпадающих электронов. Стандартные отклонения варьируются от 2 до 10 % в диапазоне средних энергий от 0,1 до 20 кэВ.



Таким образом, мы можем определить зависимость E_{cr} — средней энергии — от $h_{\max}$ — высоты максимума интенсивности излучения на длине волны $\lambda 427.8$ нм.

Эта кривая может быть использована для оценки средней энергии потока электронов в полярных сияниях.



Заключение

В докладе представлены методики оценки средней энергии потока авроральных электронов $E_{\text{ср}}$ по фотометрическим наблюдениям излучений одной эмиссии -полосы первой отрицательной системы молекулярного азота 1NG N_2^+ с длиной волны $\lambda 427.8$ нм.

Первая методика показывает возможность оценки $E_{\text{ср}}$ по интенсивности эмиссии $\lambda 427.8$ нм. В основу методики положена экспериментальная зависимость отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ от $I_{427.8}$. Результаты модельных расчетов показали, что форма энергетического спектра авроральных электронов, вариации содержания атомарного кислорода нейтральной атмосферы и концентраций окиси азота слабо влияют на зависимость $E_{\text{ср}}$ от отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$. Из смоделированной зависимости средней энергией $E_{\text{ср}}$ от $I_{630.0}/I_{427.8}$ и экспериментальной зависимости $I_{630.0}/I_{427.8}$ от $I_{427.8}$ установлена связь между $E_{\text{ср}}$ и $I_{427.8}$. Аналитическая аппроксимация полученной зависимости может быть использована в разработке методик оперативной диагностики.

Вторая методика предлагает определение $E_{\text{ср}}$ по высоте максимального свечения эмиссии $\lambda 427.8$ нм - h_{max} . Моделирование эмиссии $\lambda 427.8$ нм показало, что h_{max} слабо зависит от формы энергетического спектра и пичч-углового распределения потока и определяется средней энергией высыпавшихся электронов. Смоделирована зависимость $E_{\text{ср}}$ от h_{max} , которая может быть использована для быстрой диагностики средней энергии авроральных электронов.

Литература

- Дашкевич Ж.В. и др. Геомагнетизм и аэроном. 2006. Т. 46. №3. С. 385– 389.
- Дашкевич Ж.В. и др. Космические исслед. 2017. Т.55. № 2. С. 94–106. DOI: 10.7868/S0023420617020029
- Cristensen A.B. et al. J.Geophys.Res. 1987. V. 92. №6. P. 6163-6167. DOI:10.1029/JA092iA06p06163
- Gattinger R.L. et al. Ann. Geophys. 1996. V. 14. №. 7. P. 687-698. DOI:10.1007/s00585-996-0687-1
- Rees M.H., Luckey D. J. Geophys. Res. 1974.V.79.№34.P.5181-5186. DOI:10.1029/JA079i034p05181.
- Sharp W.E. et al. J. Geophys. Res. 1979. V.84. №A5. P.1977-1984. DOI: 10.1029/JA084iA05p01977
- Shepherd G.G., Gerdjikova M.J. Planet. Space Sci. 1988. V.36. P. 893-895. DOI: 10.1016/0032-0633(88)90096-7
- Vallance Jones A. et al. J.Geophys.Res.1987. V. 92. №A5. P.4575-4589