

## РОЛЬ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОЙ ПОРОГОВОЙ ЭНЕРГИИ В ФИЗИКЕ ВЕРХНИХ АТМОСФЕР ПЛАНЕТ

© 2005 г. С. В. Авакян, доктор физ.-мат. наук

ВНЦ “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: avak@soi.spb.ru

В течение последних 30 лет в ГОИ им. С.И. Вавилова были последовательно учтены в физике верхней атмосферы и ионосферы новые процессы, хорошо известные из физики плазмы, спектроскопии и физики столкновений: эффект Оже, двукратная фотоионизация, ридберговское возбуждение. Все указанные процессы отличаются высокой пороговой энергией. Следовательно, их вклад особенно важен для периода как естественных (солнечные вспышки, геомагнитные бури), так и искусственных (включая импульс рентгеновского излучения высотного ядерного взрыва) возмущений в ионосфере Земли. В статье представлены результаты выполненной работы, ее место в современной науке, перспективы дальнейших исследований.

Коды OCIS: 020.2070.

Поступила в редакцию 08.02.2005.

### 1. Введение

Основная проблема физики ионосферы и верхней атмосферы состоит в необходимости создания адекватных моделей явлений и процессов с целью предсказания и объяснения наблюдаемых характеристик при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности. Особенно важно моделирование в возмущенных условиях – в периоды солнечных вспышек и геомагнитных бурь, когда степень ионизации и уровень оптического возбуждения верхней атмосферы сильно возрастают, что приводит к ухудшению качества радиосвязи и усложнению фоновой обстановки при работе оптико-электронной аппаратуры ракетно-космической техники.

При всех естественных возмущениях, а часто и при искусственных активных воздействиях на ионосферу наиболее сильно возрастают потоки вторгающихся в верхнюю атмосферу частиц сравнительно высоких энергий. В периоды солнечных вспышек резко увеличивается доля рентгеновской области спектра, во время геомагнитных бурь уже и на средних широтах появляются высыпания высокоэнергичных электронов и протонов из радиационных поясов. Энергии этих частиц и во время вспышки на Солнце, и при высыпаниях достаточно для ионизации не только наружной, но и внутренней оболочки любого атмосферного газа. Вот почему и были последовательно введены в аэронию\* три новых

для нее процесса [1]: эффект Оже [2], двукратная фотоионизация наружной оболочки одним квантом [3, 4] и ридберговское возбуждение атомов и молекул [5]. Эти результаты были учтены в существующих тогда моделях ионосферы с участием ученых Института прикладной геофизики, Сибирского института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн и Иркутского государственного университета.

Анализ результатов выполненных модельных расчетов, уровня их учета в современных аэронамических моделях и степени подтверждения вклада новых процессов космическими экспериментами и составляют основу данной статьи.

### 2. Эффект Оже

Главный вклад эффект Оже дает в спектр ионосферных сверхтепловых электронов. Это фотоэлектроны, прежде всего солнечные фотоэлектроны, а также и вторичные электроны, образующиеся при корпускулярных высыпаниях (электронов, а также протонов) из радиационных поясов.

Эффект Оже [6], как известно, представляет собой физический процесс, сопровождающий в 99% случаев ионизацию внутреннего электрона с  $K$ -оболочки любого атмосферного газа. Альтернативный процесс – флуоресценция кванта характеристического рентгеновского излучения при заполнении образующейся  $K$ -вакансии после ионизации любого типа частицей (квантом рентгеновского диапазона с  $\lambda < \lambda_K$ , электроном, протоном, тяжелым атомом, молекулой или ионом). Его вероятность  $\omega_K$  ничтожна [7] (см. табл. 1 [8]). При эффекте Оже энергию, выделившуюся в результате оже-перехода – перехода электрона внешней электронной оболочки на

\* Аэронамические исследования – исследования атмосферных процессов с точки зрения атомных и молекулярных взаимодействий и взаимодействия солнечного излучения с атомами и молекулами воздуха. (Космонавтика. Энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1989. С. 40.)

**Таблица 1.** Энергии электронов Оже ( $\Delta E_0$ ), *K*- и *L*-края поглощения ( $E_n$ ) и выходы флуоресценции на один атом ( $\omega$ ) в атмосферных газах

Газ	$E_n$ , нм [9, 10]	$\omega$ , % [7]	$\Delta E_0$ , эВ	Литература*
O	2,3	0,69	474–509	[11]
O <sub>2</sub>	2,3	0,69	456–507	[12]
N <sub>2</sub>	3,1	0,43	315–367	[12]
CO	4,4 (C)	0,26 (C)	221–256	[12]
	2,3 (O)	0,69 (O)	437–502	
CO <sub>2</sub>	4,4 (C)	0,26 (C)	223–260	[12]
	2,3 (O)	0,69 (O)	467–508	
H <sub>2</sub> O	2,3	0,69	448–501	[12]
HCl	6,15 ( <i>L</i> -край)	0,12( <i>L</i> )	162–174	[13]
	0,44 ( <i>K</i> -край)	9,89( <i>K</i> )	2249–2391	
CH <sub>4</sub>	4,4	0,26	229–250	[14, 15]
NH <sub>3</sub>	3,1	0,43	325–373	[14]

\* Для энергии оже-электронов.

внутреннюю вакансию, уносит, как правило, один оже-электрон. Энергии этих оже-электронов определяются практически только типом атмосферного газа, а сами электроны образуют группы в энергетическом интервале около 50 эВ (см. табл. 1). Энергетические распределения оже-электронов внутри группы известны либо из экспериментальных данных, полученных методом ESCA (electron spectroscopy for chemical analysis), либо (для атомов углерода, азота и кислорода) по теоретическим расчетам вероятностей соответствующих *K*-*LL*-оже-переходов. Для аэронамики важно, что угловое распределение оже-электронов практически изотропное, что увеличивает вероятность ухода электронов Оже из верхней ионосферы в магнитосферу и в наибольшей мере определяет превосходные эффекты в оптике сопряженного полушария верхней атмосферы.

Учет оже-электронов кардинально меняет как форму, так и интенсивность спектра фотоэлектронов, если расчеты проводятся при энергиях, превышающих 100–200 эВ. Это связано с тем обстоятельством, что энергии оже-электронов превышают для основных атмосферных газов несколько сотен электронвольт и поэтому при диссипации их энергии в процессах столкновений в ионосфере Земли этот источник электронов проявляется как дополнительный при более низких энергиях. Вообще, относительный вклад оже-электронов в спектр фотоэлектронов более низких энергий зависит от соотношения потоков рентгеновского излучения Солнца (короче 3,1 нм для земной ионосферы) и крайнего УФ излучения (короче 51,5 нм). Последняя величина определяется тем обстоятельством, что энергии кванта

указанной длины волны достаточно для фотоионизации и последующей ионизации высвобождающимся при этом фотоэлектроном наиболее легко ионизируемого газа из основных составляющих верхней атмосферы – молекулы кислорода ( $E_{\text{пор}} = 12,07$  эВ).

Рассматриваемое соотношение рентгеновского и крайнего УФ излучений, проникающих от Солнца в верхнюю атмосферу, зависит от уровня солнечной активности, доходя до максимальных значений в периоды мощных солнечных вспышек, а также от степени поглощения солнечных излучений в вышележащих слоях атмосферы. Очевидно, что относительная роль рентгеновского излучения возрастает в сумеречных условиях, увеличиваясь в низких ионосферных слоях, и становится максимальной при высокой солнечной активности.

Особенно важен учет эффекта Оже в аэронамики при рассмотрении влияния излучения солнечных вспышек на УФ излучение и добавочную ионизацию верхних атмосфер планет и комет. Однако к настоящему времени для проверки теоретических моделей такого отклика даже земной верхней атмосферы и ионосферы не хватает экспериментальных данных. Во-первых, до сих пор практически отсутствует постоянный патруль солнечной радиации в наиболее существенном для процессов фотоионизации верхней атмосферы и ионосферы Земли диапазоне от 0,8 до 120 нм. Сейчас имеются сведения об абсолютных потоках Солнца в данном диапазоне со спутника TIMED, но такие измерения выполняются лишь менее 4 мин за каждый виток (длительность которого 97 мин), и поэтому в [16] констатируется, что TIMED не предназначен для измерений потоков излучения солнечных вспышек. Фактически не проводились комплексные эксперименты с одновременным измерением как потоков солнечной ионизирующей радиации, так и интенсивности ультрафиолетовых эмиссий верхней атмосферы и спектра фотоэлектронов на ионосферных высотах, определяющих возбуждение этих эмиссий.

Вспышечное возрастание приводит к ограниченному во времени на период от минут до часов увеличению энергии, поглощаемой верхней и средней атмосферой Земли. При этом относительное увеличение потока ионизирующего солнечного излучения максимально в коротковолновой области короче 2–4 нм, а абсолютный прирост полностью определяется длинноволновой частью спектра. Однако и для дополнительного ионообразования, и для усиления возбуждения УФ эмиссий верхней атмосферы вклад рентгеновского излучения для достаточно сильных вспышек превосходит вклад жесткого ультрафиолетового излучения. Это связано с

определяющей ролью рентгеновского излучения в образовании ионосферных фото- и оже-электронов – главного фактора дополнительного ионообразования и УФ возбуждения ионосферы.

Итак, к настоящему времени нет сведений об интенсивности потока и спектре ионизирующего излучения текущих солнечных вспышек и тем более нет возможности прогнозировать эти основные для ионосферного моделирования характеристики вспышек. Данное обстоятельство требует постановки и проведения работ по созданию постоянного космического пагуля жесткого УФ и мягкого рентгеновского излучений Солнца [17].

Второй пробел связан с недостаточностью наших знаний о фотоэлектронах на ионосферных высотах во время солнечных вспышек различных классов. Основной рост солнечных ионизирующих потоков во время вспышки происходит в рентгеновском диапазоне, где при фотоионизации основная часть энергии кванта передается фотоэлектронам и оже-электронам. Следовательно, важной стадией ионосферного моделирования является корректный расчет спектра ионосферных фотоэлектронов. Для проверки этих расчетов необходимо иметь возможность сравнения их результатов с экспериментальными спектрами энергичных фотоэлектронов, измеряемыми в верхней атмосфере со спутников. В действительности такие измерения на ионосферных высотах до сих пор не выполнены. К настоящему времени опубликованы данные, полученные со спутника ISIS [18] для высоты около 3000 км (включая периоды солнечной вспышки вплоть до энергии фотоэлектронов, равной 400 эВ), со спутника “Интеркосмос-19” [19] (для спокойного Солнца на высотах 500–600 км, включая энергии фотоэлектронов 20–150, 500, 1000 и 5000 эВ), со спутника DE-B (для спокойного Солнца при энергиях вплоть до 850 эВ на высотах 430, 590 и 770 км) [20] и со спутника FAST во время солнечной вспышки 21 апреля 2002 г. на высоте 3700 км для энергетического интервала фотоэлектронов от 10 до 1000 эВ [16]. Эти немногочисленные данные показывают значительное уменьшение (до нескольких раз даже для спокойного Солнца) во всех моделях расчета интенсивности спектров фотоэлектронов, которые не включают электроны Оже [21].

Таким образом, любая модель фотоэлектронов в верхних атмосферах планет должна учитывать электроны Оже.

Вылет оже-электрона – второго электрона ионизации после образования вакансии в *K*-оболочке, приводит суммарно к образованию в ионосфере двухзарядных положительных атомных и молекулярных ионов всех газов верхней атмосферы. Часть этих ионов быстро распадается на пару однократно

заряженных положительных ионов, но в нижней ионосфере эффект Оже является основным источником двухзарядных ионов, особенно во время сильных солнечных вспышек. Двухзарядные ионы превалируют во всей толще ионосферы при высотном ядерном взрыве.

К образованию двухзарядного атомного или молекулярного положительного иона приводит простой эффект Оже. Возможен, однако, и двойной эффект Оже, когда энергия оже-перехода перераспределяется между двумя оже-электронами, покидающими атом или молекулу, как правило, с неравными энергиями. При этом, как и в случае фотоэлектронов при двукратной фотоионизации, обычно один оже-электрон уносит почти всю энергию оже-перехода. Образование внутренней вакансии сопровождается эффектом встряски, что также приводит к образованию многозарядного иона. Наша оценка вероятности выхода ионов  $O^{+++}$  в освещенной Солнцем ионосфере Земли показала, что она составляет с учетом двойного оже-процесса и эффекта встряски порядка 30% от полного числа образованных *K*-вакансий [7].

Следует подчеркнуть, что первоначальная ионизация внутренней оболочки в условиях верхних атмосфер планет может осуществляться при любом воздействии: рентгеновским квантом, энергичными электроном, протоном, тяжелой атомной частицей. Во всех этих случаях энергетический спектр оже-электронов практически одинаков, а их угловое распределение изотропно. Последнее обстоятельство особенно важно для энергетики планетных ионосфер, поскольку оже-электроны составляют основную часть потока вторичных электронов, уносящих энергию из планетных атмосфер.

Итак, в результате эффекта Оже в верхних атмосферах планет образуются, во-первых, группы электронов (электронов Оже) с дискретной энергией, во-вторых, двухзарядные и даже трехзарядные положительные ионы.

Впервые последовательное рассмотрение вклада эффекта Оже в аэрномию Земли, Марса и Венеры, а также комет проведено в серии наших работ [22–38]. Результаты этих модельных рассмотрений подтверждены во всех космических экспериментах по измерению ионосферных фотоэлектронов, если приборы были способны измерять полный спектр вплоть до энергии в несколько сотен электронвольт [16, 18–20]. Важно, что энергии электронов Оже несут информацию о типе атмосферного газа любой планеты Солнечной системы, и это может быть использовано для энергетической калибровки электронных спектрометров в космическом полете. Этот факт необходимо учитывать при построении модельных спектров [16, 39–41]. Отметим, что в [16]

такой спектр построен без учета того, что реальный спектр оже-электронов из кислорода располагается при энергиях, ниже значений 509 эВ (табл. 1).

### 3. Двукратная фотоионизация

Как известно, кроме однократной, имеется определенная вероятность и двукратной фотоионизации одним квантом. Это также процесс с высоким энергетическим порогом. Для атома кислорода первая оценка сечения двукратной фотоионизации, расчеты вклада этого процесса в образование двухзарядных ионов  $O^{++}$  ионосферы и первичные спектры фотоэлектронов выполнены в наших работах [3, 4, 42] (см. также [43]). Подчеркнем, что работа [43] была представлена на восемь месяцев позднее нашей работы [4]. Для большинства молекул адекватных данных по сечениям двукратной фотоионизации не имеется [8], но для молекул  $CO$  и  $CO_2$  получены новые экспериментальные доказательства больших значений этих сечений [44, 45].

Конечное состояние молекулярного иона может отвечать как связанному относительно движения ядер состоянию, так и несвязанному. В первом случае образуются стабильные молекулярные ионы, а во втором происходит диссоциация с образованием положительного иона меньшей массы и нейтрального осколка. После диссоциативной ионизации двухзарядного иона положительный заряд имеют, как правило, оба фрагмента. Правомерность описания процесса диссоциативной ионизации как последовательности двух реакций (образования при фотоионизации высоковозбужденного молекулярного иона и развала этого иона на фрагменты) связана с тем, что в большинстве случаев характерное время ионизации ( $10^{-16}$ – $10^{-15}$  с) значительно меньше характерного времени самой быстрой диссоциации ( $10^{-13}$  с) [46]. Это позволяет считать, что как при однократной, так и при двукратной (многократной)

фотоионизации молекул сечение процесса передачи энергии фотоэлектрону соответствует сечению образования молекулярного иона в определенном энергетическом состоянии.

Потенциалы появления двухзарядных ионов в основном состоянии представлены в табл. 2 [8].

Ионосферные ионы  $O^{++}$  на высотах  $F$ -области и выше образуются в основном именно через процесс двукратной фотоионизации [4]. В [47, 48] рассмотрена их уникальная роль в физике ночной  $F$ -области. Действительно, космонавты обнаружили реакцию ночной  $F$ -области ионосферы на солнечные вспышки в виде усиления ее видимого свечения после сильных геомагнитных бурь [49]. Этот эффект полностью подтвержден наблюдениями Абастуманской астрофизической обсерватории [50], при этом фотометрические измерения в красной линии атомарного кислорода 630 нм показали возрастание интенсивности этой эмиссии на 20–100%, а ионозондовые измерения подтвердили увеличение электронной концентрации в максимуме  $F$ -слоя до 10%. Объяснение этого нового геофизического явления дано в [47, 49] как вклад резонансного рассеяния на ночную сторону солнечных линий 30,4, 50,7, 58,4, 70,3, 83,4 нм на ионах  $O^{++}$ , а также  $O^+$ ,  $He^+$  и атоме  $He$  геокороны. Дело в том, что после сильной геомагнитной бури плазмосфера опустошена и начинает в течение десятков часов заполняться ионосферными ионами  $O^{++}$  [48] с образованием в десятки раз увеличенного слоя ионов  $O^{++}$  в ближней геокороне (на высотах 500–1700 км). Этот эффект сильного увеличения относительной концентрации ионов  $O^{++}$  в геокороне после геомагнитных бурь подтверждается данными ИСЗ GEOS-1, -2, DE-1 и EXOS-D (АКЕ-ВОНО) [51, 52].

Итак, в разделах 2 и 3 обобщены результаты введения в физику ионосферы двух новых процессов: эффекта Оже и двукратной фотоионизации. Эти новые результаты использованы в [53–60].

### 4. Ридберговское возбуждение верхней атмосферы и ионосферы Земли

В [5] было впервые предложено рассматривать возможность возбуждения ридберговских уровней атомов и молекул в верхней атмосфере ионосферными фотоэлектронами и вторичными электронами при авроральных высыпаниях. Результаты этих расчетов были опубликованы в [61, 62] и частично представлены в [63]. Надо отметить, что ранее упоминалось о возможной важной роли ридберговских состояний в верхней атмосфере [64], в том числе для химического разогрева в полярных сияниях [65]. Еще раньше в СССР выполнены эксперименты с ридберговским возбуждением основных атмосферных молекул [66]. Сейчас ридберговские состояния

**Таблица 2.** Потенциалы появления двухзарядных ионов в основном состоянии

Газ	Потенциал появления, эВ
O	48,74
O <sub>2</sub>	36,3 ± 0,5
N <sub>2</sub>	43,00
CO	41,294
CO <sub>2</sub>	37,6 ± 0,3
H <sub>2</sub>	47,5
H <sub>2</sub> O	39,2
HCl	35,9 ± 0,2
CH <sub>4</sub>	38,9 ± 0,7
NH <sub>3</sub>	35,3 ± 0,7

учитываются как в физике межзвездных облаков [67], так и в объяснении стабильности шаровой молнии [68], хотя последняя гипотеза представляется проблематичной.

Что касается ионосферного существования ридберговских атомов и молекул, то оно подтверждается прямыми оптическими экспериментами [69], а еще ранее в СССР при одновременных измерениях в нескольких пунктах спорадического радиосигнала (по программе SETI) было обнаружено существенное его превышение (до 40 раз) над фоном в периоды солнечных вспышек и магнитных бурь (полярных сияний) [70–72] на длинах волн 3–50 см. Это микроволновое излучение было нами связано с ридберговскими переходами в атомах и молекулах верхней атмосферы, поскольку, во-первых, в [70–72] было четко определено, что оно излучается земной ионосферой с высоты порядка 200 км, во-вторых, основная масса излучательных, разрешенных правилами отбора для электрических дипольных переходов, линий и полос в атмосферных газах лежит в диапазоне от миллиметров до дециметров [63].

В настоящее время наиболее интересным представляется учет микроволнового ионосферного излучения в солнечно-магнитосферно-биосферных связях [63, 73]. Много десятилетий стоит проблема раскрытия физической природы “Агента X”, введенного А.Л. Чижевским, в механизме воздействия солнечной активности на биосферу [74, 75]. Поскольку микроволновое излучение (вплоть до 0,8 мм) почти свободно проникает до биосферы (за исключением трех полос поглощения у 1,3, 2,5 и 5 мм), то можно полагать, что именно оно несет информацию о всех вариациях солнечной (включая вспышки на Солнце) и геомагнитной (сопровождающейся высыпаниями электронов и протонов из радиационных поясов) активности и доводит эту информацию до биосферы и самых нижних слоев атмосферы [1, 63, 73, 76].

### Заключение

За последние 30 лет в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова были последовательно введены в аэронию из физики атомных столкновений и оптики три новых для ионосферной физики процесса:

- эффект Оже при фотоионизации и корпускулярной ионизации (электронами и протонами);
- двукратная фотоионизация наружной атомной оболочки одним квантом;
- ридберговские состояния атомов и молекул верхней атмосферы с возбуждением ионосферными сверхтепловыми электронами (фотоэлектронами, вторичными электронами и электронами Оже).

В результате существенно изменились представления о каналах и уровне возмущения ионосферы Земли в естественных (солнечные вспышки и магнитные бури) и искусственных (воздействия высотных ядерных взрывов) условиях.

Все предложенные механизмы и модели, а также обнаруженные на их основе новые геофизические явления имеют подтверждения в отечественных и зарубежных космических экспериментах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Avakyan S.V. New processes in aeronomy: Auger effect – 30 years later, multiple photoionization – 25 years later, Rydberg excitation – 10 years later // Proc. of 5th Intern. conf. “Problems of Geocosmos”. Spb., 2004. P. 191–195.
2. Авакян С.В. Учет оже-процессов в верхней атмосфере Земли // Тез. докл. на 10 научно-технич. конф. молодых специалистов ГОИ им. С.И. Вавилова. Л.: ГОИ, 1974. С. 29–31.
3. Авакян С.В. Двухзарядные ионы атомного кислорода в возмущенной ионосфере // Космич. исследования. 1978. Т. 16. № 1. С. 115–118.
4. Авакян С.В. Образование ионов  $O^{++}$  в верхней атмосфере // Космич. исследования. 1979. Т. 17. № 6. С. 942–943.
5. Авакян С.В. Новый фактор в физике солнечно-земных связей – ридберговские состояния атомов и молекул // Тез. докл. Межд. конф. по физике солнечно-земных связей. Алматы, 1994. С. 3–5.
6. Auger P.V. Sur l’effect photoelectrique compose // J. Phys. et Radium. 1925. V. 6. № 6. P. 205–208.
7. Hubbell J.H., Trehan P.N., Singh N., Chand B., Mehta D. and Garg M.L. A review, bibliography, and tabulation of K, L and higher atomic shell X-ray fluorescence yields // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1994. V. 23. № 2. P. 339–364.
8. Avakyan S.V., Il’in R.N., Lavrov V.M., Ogurtsov G.N. Collision Processes and Excitation of the Ultraviolet Emission from Planetary Atmospheric Gases. Handbook of Cross Sections / Ed. Avakyan S.V. London: Gordon and Breach Publ., 1998. 354 p. / Авакян С.В., Ильин Р.Н., Лавров В.М., Огурцов Г.Н. Сечения процессов ионизации и возбуждения УФ излучения при столкновениях электронов, ионов и фотонов с атомами и молекулами атмосферных газов. СПб.: ГОИ им. С.И. Вавилова, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2000. 365 с.
9. Bearden J.A. X-ray wavelengths // Rev. Mod. Phys. 1967. V. 39. № 1. P. 78–124.
10. Bearden J.A., Burr A.F. Reevaluation of X-ray atomic energy levels // Rev. Mod. Phys. 1967. V. 39. № 1. P. 125–142.
11. Siegbahn K., Nordling C., Fahlman A., Nordberg B., Hamrin K., Hedman J. et al. Atomic, molecular and solid state structure studied by means of electron spectroscopy // Nova Acta regial societatis scientiarum Upsaliensis, Uppsala: Almqvist and Wiksells boktr. 1967. Ser. IV. № 20. P. 282.

12. *Moddeman W.E., Carlson T.A., Krause M.O., Pullen B.P., Bull W.E. and Schweitzer G.K.* Determination of the K-LL Auger spectra of N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, NO, H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> // *J. Chem. Phys.* 1971. V. 55. № 5. P. 2317–2336.
13. *Kvalheim O.M.* Configuration in the L<sub>2,3</sub> – MM Auger spectrum of HCl and H<sub>2</sub> // *Chem. Phys. Lett.* 1983. V. 98. № 5. P. 457–462.
14. *Thompson M., Baker M.D., Christie A., Tyson J.F.* Auger electron spectroscopy // N.-Y.: John Wiley and Sons, 1985. P. 394.
15. *Kivimaki A., Neeb M., Kempgens B., Koppe H.M., Bradshaw A.M.* The C 1s Auger decay spectrum of CH<sub>4</sub> molecule: the effects of vibrational fine structure, double excitations and shake-up transitions // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 1996. V. 29. № 13. P. 2701–2709.
16. *Woods T.N., Rottman G.J.* Solar Ultraviolet Variability Over Time Periods of Aeronomic Interest / In “Atmospheres in the Solar System: Comparative Aeronomy”. *Geophysical Monograph.* 2002. V. 130. P. 151–167.
17. *Авакян С.В., Афанасьев И.М., Воронин Н.А. и др.* Тестирование рентгеново-ультрафиолетового спектрометра космического солнечного патруля // *Оптический журнал.* 2005. Т. 72. № 8. С. 54–59.
18. *Wrenn G.L.* Satellite measurements of photoelectron fluxes // *Ann. Geophys.* 1974. V. 30. № 1. P. 49–57.
19. *Shuiskaya F.K., Mularchik T.M., Sinitsin V.M., Romanova T.V.* Observations of the photoelectrons in the Earth's upper atmosphere on soviet satellites // Moscow: Space Research Institute. Preprint–1302, 1988. 22 p.
20. *Winningham J.D., Decker D.T., Kozyra J.U., Jasperse J.R., Nagy A.F.* Energetic (>60 eV) atmospheric photoelectrons // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. A11. P. 15335–15348.
21. *Авакян С.В.* Оже-процессы в оптике верхней атмосферы // *Оптический журнал.* 1998. Т. 65. № 11. С. 4–10.
22. *Авакян С.В., Власов М.Н.* Auger processes in ionosphere // *Int. Symp. Solar–Terr. Phys. San Paulo.* 1974. V. 3. P. 191–199.
23. *Авакян С.В., Власов М.Н.* Об оже-электронах в ионосфере // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1975. Т. 15. № 3. С. 483–486.
24. *Власов М.Н., Авакян С.В.* Поток и спектр оже-электронов в верхней атмосфере // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1976. Т. 16. № 6. С. 1038–1041.
25. *Авакян С.В., Хазанов Г.В., Коен М.А.* Спектры образующихся фотоэлектронов с учетом оже-процессов при различных зенитных углах Солнца // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1977. Т. 17. № 3. С. 536–538.
26. *Авакян С.В., Коен М.А., Кудряшев Г.С., Хазанов Г.В.* Роль оже-процессов в формировании фотоэлектронных спектров // *Космич. исследования.* 1977. Т. 15. № 4. С. 631–632.
27. *Авакян С.В., Дядичев В.Н., Козлов С.И.* Оже-электроны при воздействии на верхнюю атмосферу импульса рентгеновского излучения // *Космич. исследования.* 1977. Т. 15. № 2. С. 313–315.
28. *Авакян С.В., Власов М.Н., Кринберг И.А.* Сравнение потоков и спектры оже-электронов и фотоэлектронов в ионосфере и плазмoсфере // *Геомagnet. и аэрoномия.* 1977. Т. 17. № 1. С. 84–89.
29. *Авакян С.В.* Спектр энергичных фотоэлектронов в атмосферах Марса и Венеры // *Космич. исследования.* 1978. Т. 16. № 6. С. 919–923.
30. *Авакян С.В.* Двухзарядные молекулярные ионы в авроральной ионосфере // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1978. Т. 18. № 4. С. 652–656.
31. *Авакян С.В.* Об оже-эффекте в атмосферах комет // *Кометы и метеоры.* 1980. Т. 29–31. С. 14–20.
32. *Авакян С.В., Дробжнев В.И., Краснов В.М., Кудряшев Г.С., Лазарев А.И., Николаев А.Г. и др.* Волны и излучение верхней атмосферы, Алма-Ата: Наука, 1981. 170 с.
33. *Авакян С.В.* Оже-электроны в авроральной ионосфере // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1983. Т. 23. № 2. С. 324–326.
34. *Авакян С.В.* Ионный состав в верхней атмосфере при воздействии источника рентгеновского излучения // *Космич. исследования.* 1983. Т. 21. № 6. С. 907–911.
35. *Авакян С.В., Кудряшев Г.С.* Спектр фотоэлектронов в верхней атмосфере Земли при солнечных вспышках // *Космич. исследования.* 1984. Т. 22. № 6. С. 889–894.
36. *Авакян С.В., Кудряшев Г.С.* Возбуждение и ионизация в верхней атмосфере во время солнечных вспышек с учетом фотоэлектронов // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1984. Т. 24. № 4. С. 693–695.
37. *Авакян С.В.* Воздействие на оптику верхней атмосферы импульсного источника рентгеновского излучения с учетом эффекта Оже // *Оптический журнал.* 1999. Т. 66. № 4. С. 5–11.
38. *Avakyan S.V.* Some purposes and methods of the satellite measurements of the ionospheric response on the solar flares // *J. Physics and Chemistry of Earth, Part C: Solar-Terrestrial and Planetary Sciences.* 2001. V. 26. № 4. P. 259–263.
39. *Bailey S.M., Barth C.A., Solomon S.C.* A model of nitric oxide in the lower thermosphere // *J. Geophys. Res.* 2002. A10. P. 107.
40. *Cravens T.E., Vann J., Clark J., Yu J., Keller C.N., Brull C.* The ionosphere of Titan: an updated theoretical model // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. P. 212–215.
41. *Mitchell D.L., Lin R.P., Reme H., Crider D.H., Cloutier P.A.* Oxygen Auger electrons observed in Mars' ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 1801.
42. *Авакян С.В., Черепков Н.А.* Двукратная фотоионизация атома кислорода и спектр ионосферных фотоэлектронов // *Тез. докл. на 3 Всесоюзном симпозиуме “Оптические исследования верхней атмосферы”.* Ужгород, 1977. С. 27–29.

43. *Victor G.A., Constantinides E.R.* Double photoionization and double charged ions in the thermosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6. № 6. P. 519–522.
44. *Masuoka T.* Single-, double- and triple-photoionization cross section of carbon monoxide (CO) and ionic fragmentation of  $\text{CO}^+$ ,  $\text{CO}^{2+}$  and  $\text{CO}^{3+}$  // *Phys. Rev. A.* 1993. V. 48. № 6. P. 4379–4389.
45. *Masuoka T.* Single- and double-photoionization cross sections of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) and ionic fragmentation of  $\text{CO}_2^+$  and  $\text{CO}_2^{2+}$  // *Phys. Rev. A.* 1994. V. 50. № 5. P. 3886–3894.
46. *Акопян М.Е., Головин А.В., Родин А.А.* Спектроскопия фотоионизации молекул. СПб.: СПбГУ, 1996. 316 с.
47. *Авакян С.В., Коваленок В.В., Солоницына Н.Ф.* Ночная F-область ионосферы в период вспышек на Солнце // *Алма-Ата: Наука*, 1984. 150 с.
48. *Авакян С.В., Демин М.Г.* Диффузия двухзарядных ионов  $\text{O}^{++}$  в плазмосферу в восстановительную фазу ионосферной бури // *Космич. исследования.* 1988. Т. 21. № 5. С. 806–810.
49. *Коваленок В.В., Лазарев А.И., Кудряшев Г.С., Авакян С.В.* Обнаружение явления реакции ночной верхней ионосферы на солнечные вспышки с орбитальной станции “Салют-6” / В кн. “Исследования атмосферы и земной поверхности из космоса”. Тарту, 1988. С. 10–21.
50. *Авакян С.В., Кудряшев Г.С., Фишкова Л.М.* Об усилении эмиссии O I 630 нм свечения ночного неба во время солнечных вспышек // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1985. Т. 25. № 3. С. 415–419.
51. *Авакян С.В., Евлашин Л.С., Коваленок В.В., Лазарев А.И., Титов В.Г.* Наблюдения полярных сияний из космоса // Л.: Гидрометеоздат, 1991. 229 с.
52. *Авакян С.В.* Исследования гелиогеофизических возмущений в ночных условиях с пилотируемых космических аппаратов // *Оптический журнал.* 1997. Т. 64. № 10. С. 60–66.
53. *Кринберг И.А.* Кинетика электронов в ионосфере и плазмосфере Земли. М.: Наука. 1978. 215 с.
54. *Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф.* Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве. Справочник. СПб.: Гидрометеоздат, 1994. 501 с.
55. *Rees M.H.* Physics and chemistry of the upper atmosphere // *Cambridge Univ. Press*, 1989. 289 p.
56. *Avakyan S.V.* The possible method of registration of radioactive air ejection by means of optical fluorescence // *Proc. SPIE.* 1997. V. 3220. P. 344–347.
57. *Авакян С.В., Шендрик М.С.* Способ регистрации радиоактивных воздушных выбросов по оптической флюоресценции // Патент России № 2142146. 1997.
58. *Avakyan S.V., Lazarev A.I., Serova A.E., Voronin N.A., Il'in V.V., Starchenko A.N., Tcharuhchev A.V.* Development of the method of radioactive cloud registration // *Proc. SPIE.* 1998. V. 3493. P. 242–246.
59. *Torr D.G.* Neutral and ion composition of the thermosphere // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1983. V. 21. № 2. P. 245–262.
60. *Applied Atomic Collision Physics / Eds. Massey H.S.W., Bates D.R.* Academic Press, 1982. V. 1. Atmospheric Physics and Chemistry. P. 65–66.
61. *Авакян С.В., Воронин Н.А., Серова А.Е.* Роль ридберговских атомов и молекул в верхней атмосфере // *Геомагнетизм и аэрномия.* 1984. Т. 37. № 3. С. 99–106.
62. *Avakyan S.V.* New possible mechanism of sporadic ionospheric radioemissions // 25th Gen. Assembly URSI, France, G1: Ionospheric models and indices. Abstract. 1996. P. 346.
63. *Авакян С.В.* Микроволновое излучение ионосферы как фактор воздействия солнечных вспышек и геомагнитных бурь на биосферу // *Оптический журнал.* 2005. Т. 72. № 8. С. 41–48.
64. *Mulliken R.S.* Rydberg states and rydbergization // *Accounts of Chem. Research.* 1976. V. 9. № 1. P. 7–12.
65. *Well W.C., Borst W.L., Zipf E.C.* Translational spectroscopy of metastable fragments produced by dissociative excitation of atmospheric gases by electron impact // *Phys. Rev. A.* 1976. V. 14. № 2. P. 695–706.
66. *Куприянов С.Е.* Процессы образования высоковозбужденных атомов при столкновениях электронов с молекулами  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ , и  $\text{N}_2$  // *ЖЭТФ.* 1968. Т. 55. С. 460–468.
67. *Сороченко Р.Л., Бороздич Е.В., Дравских З.Б., Дравских А.Ф., Кардашев Н.С.* Радиолинии возбужденного водорода ( $n = 100$ ) // *Диплом СССР на открытие № 47.* 1964.
68. *Gilman J.J.* Cohesion in ball lightning // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 83. № 11. P. 2283–2284.
69. *Paulsen D.E., Blumberg A.W., Lipson S.J.* The EXCEED III Artificial Experiment // 21st Ann. Europ. Meet. Atmos. Studies Opt. Meth. London. Abstract. 1994. P. 121.
70. *Троицкий В.С., Стародубцев А.М., Бондарь Л.Н. и др.* Поиск спорадического радиоизлучения из космоса на сантиметровых и дециметровых волнах // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1973. Т. 16. № 3. С. 323–341.
71. *Троицкий В.С., Бондарь Л.Н., Стародубцев А.М. и др.* Новый тип радиошумов. Спорадическое радиоизлучение околоземной среды на сантиметровых и дециметровых волнах // *ДАН.* 1973. Т. 212. № 3. С. 607–610.
72. *Бондарь Л.Н., Стрежнева К.М., Троицкий В.С.* Спорадическое радиоизлучение фона, солнечная активность и полярные сияния // *Астрономический вестник.* 1975. Т. 9. № 4. С. 210–217.
73. *Авакян С.В.* Биологические эффекты солнечной активности и ридберговские состояния // Междисциплинарный семинар “Биологические эффекты солнечной активности”. Пушино-на-Оке: ИКИ РАН, ИТЭБ РАН. 2004. С. 45–47.

74. *Чижевский А.Л.* Космический пульс жизни // М.: Мысль, 1995. С. 646–647.
75. *Чижевский А.Л.* Земное эхо солнечных бурь // М.: Мысль, 1976. С. 327.
76. *Avakyan S.V.* Microwave Emission of Rydberg States as a New Factor of Solar–Biosphere Relations // Proc. of 5 th Intern. conf. “Problems of Geocosmos”. SPb.: SPb State University, 2004. P. 335–338.
-