

4
АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

Препринт №22

А.Н. Дмитриев

А.А. Плаксин

А.И. Семенов

Н.Н. Шефов

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ
СДВИГ
В ВЕРХНЕЙ
АТМОСФЕРЕ**

НОВОСИБИРСК 1990

Экологический сдвиг в верхней атмосфере / Дмитриев А.Н., Плаксин А.А., Семенов А.И., Шефов Н.Н. Новосибирск, 1990. 18 с. (Препр./ Институт геологии и геофизики СО АН СССР; № 22).

Рассмотрены процессы возникновения излучения верхней атмосферы, образующегося вследствие естественных и искусственных причин. Даны количественные оценки содержания химических реагентов, стимулирующих регистрируемые интенсивности свечений. Оценены техногенные вклады инъекции вещества в верхнюю атмосферу, особенно за счет ракетных пусков. Подчеркнута экологическая важность отслеживания техногенных воздействий на верхнюю атмосферу.

Для специалистов по аэронауке, глобальной экологии, геофизиков и всех интересующихся острыми проблемами экологии.

Техноцентрическая фаза нашей цивилизации профилирует общий состав человеческой деятельности. С началом первых ракетных пусков верхняя атмосфера вовлечена в процесс интенсивного преобразования. Техногенные воздействия на нее становятся все более разнообразными и глобальными. Разнообразие наращивается не только увеличением числа ракетных пусков (от малых геофизических до систем челночного вида), но и включением исследовательских энергоемких процедур, адресуемых верхней атмосфере. Как правило, техногенный исследовательский опрос и воздействия на газоплазменные оболочки Земли сопровождаются мощными инъекциями вещества и излучения. Можно без преувеличения утверждать, что к текущему моменту верхняя атмосфера претерпела необратимые преобразования в глобальных масштабах. Эта необратимость означает, что газоплазменные оболочки Земли переходят в качественно новое функционирование, при котором нарушена периодизация и репертуар основополагающих процессов. Поэтому проблемы глобальной экологии по верхней атмосфере становятся предельно острыми.

В результате различного рода технической деятельности околоземное космическое пространство — атмосфера, ионосфера, магнитосфера — подвергается загрязнению инородными компонентами техногенного происхождения. Эта активность уже имеет общепланетарные последствия в виде уменьшения общего содержания озона /12/, глобального потепления /7/, семидневной пульсации геомагнитного поля /23/. Распыление в верхней атмосфере различных веществ сказывается на поведении светимости верхней атмосферы /20,26/. По мере роста числа и масштабов воздействий на геокосмос возрастает необходимость в количественной оценке реагентов, способствующих свечению. Важность этой задачи становится все более очевидной с учащением запусков сверхмощных носителей типа "Энергия" и "Шаттл" /4,23/. Кроме того, картирование свечений в верхней атмосфере связано с задачами обнаружения энергоактивных зон Земли, в которых отмечается сейсмическая активность /9,10,22/.

В данной работе приводятся некоторые оценки отклика собственного излучения верхней атмосферы в процессах флуоресценции, рассеяния света и хемиллюминесценции на искусственные воздействия, даны краткие экологические интерпретации и приводятся доводы о литосферных вкладах в светимость верхней атмосферы.

1. Процессы флуоресценции

Многие металлы, будучи распыленными в верхней атмосфере, могут быть легко обнаружены по своим резонансным эмиссиям, возбуждаемым излучением Солнца /24,34/. Типичным примером является натрий, постоянно присутствующий на высотах около 90-100 км в результате сгорания микрометеоритов /16/.

Независимо от средств технической инжекции химических элементов, обуславливающих флуоресценцию в солнечном излучении, количественная оценка вещества, содержащегося в светящейся области атмосферы, может быть выполнена по формуле:

$$I = \frac{m_x \cdot Q_x}{M_x \cdot m_H \cdot S}$$

Это число фотонов, излучаемых данным веществом в столбце атмосферы сечением $I \text{ см}^2$ в секунду за счет флуоресценции в солнечном излучении; где m_x - общая масса флуоресцирующего вещества, в г; Q_x - число фотонов солнечного излучения, рассеиваемых за I с одним атомом (молекулой) данного вещества; M_x - атомная или молекулярная масса; m_H - вес атома водорода, г; S - площадь флуоресцирующего пятна, см^2 .

Угловые или линейные размеры устанавливаются визуально, и переходя от площади к его диаметру D (см), получим:

$$I = \frac{4 m_x \cdot g_x}{\pi \cdot M_x \cdot m_H \cdot D^2},$$

откуда

$$m_x = \frac{\pi \cdot M_x \cdot m_H \cdot D^2 \cdot I}{4 g_x}.$$

Различные вещества, распыленные в атмосфере, неоднократно регистрировались (например: литий, алюминий, натрий, окись алюминия и ряд других) /14,16,20,21,27/.

В табл. I приведены сведения о длинах волн излучения, вычисленных значениях σ , коэффициентах поглощения β в линиях излучения для температуры $T = 240$ К, типичной для высот 90–100 км, скорости фотоионизации j солнечным излучением за пределами атмосферы. Для этих целей использовались современные данные о входящих величинах – вероятностях переходов, сечениях фотоионизации, потока солнечного излучения /II, 25, 3I/. Кроме того, даны количества распыленного вещества, создающего для начальных моментов свечения интенсивность излучения $I = 10^{11}$ фотон·см⁻²·с⁻¹ = 100 килорэлей, что обеспечивает устойчивое цветоразличие для тех случаев, когда излучение соответствует видимой части спектра. При этом размер облака D принят равным 10 км. Там же приведены средние концентрации X в предположении, что высота однородной атмосферы $H = 6 \cdot 10^5$ см. Здесь следует отметить, что при таких заданных условиях в некоторых случаях, как это следует из данных табл. I, оптическая толщина вдоль вертикали может превышать единицу.

Длительность флуоресценции, обеспечивающей достаточную яркость свечения, обуславливается как процессами расплывания облака вследствие диффузии и ветровых движений, так и процессами ионизации излучающих компонент, которые приводят к убыванию их концентрации. Ионизация происходит за счет реакций перезарядки с ионами атмосферы:



Типичные коэффициенты скорости имеют значения $\alpha \sim 2 \cdot 10^{-9}$ см³·с⁻¹ /I6/. Содержание ионов $[M^+]$ на высотах около 250 км в сумеречное время, когда проводятся такие эксперименты, составляет около $5 \cdot 10^5$ см⁻³, а на высотах вблизи 100 км – $5 \cdot 10^4$ см⁻³. Это означает, что постоянные времена такого процесса будут равны 10^3 и 10^4 с соответственно.

Одновременно с этим действие фотоионизации, диффузии и переноса определяют постоянные времени существования атомов в заданном объеме атмосферы

$$\tau = \frac{1}{\alpha [M^+] + j + D}$$

Поэтому скорость затухания свечения с учетом высоты распыленного облака и изменения его размеров позволяет получить сведения о происходящих процессах.

Характеристики флуоресцирующих элементов

Излучатель	Атомная масса, М	Длина волны λ , мкм	ε , с ⁻¹	σ , см ²	j , с ⁻¹	m , г	$[X]_{\text{см}^{-3}}$
Li	7	0,6708	15,5	6,7(-12)	2,6(-5)	0,06	1,1(4)
Na	23	0,589	0,80	1,5(-11)	1,8(-5)	3,7	2,1(5)
Mg	24	0,2852	0,056	1,8(-11)	3,7(-7)	56	3,0(6)
Mg ⁺	24	0,280	0,057	6,0(-12)	3,8(-9)	55	3,0(6)
Al	27	0,3962	0,24	1,2(-12)	4(-4)	15	7,0(5)
		0,3944	0,21	1,2(-12)		17	8,0(5)
K	39	0,7699	0,67	1,3(-11)	2,7(-6)	7,6	2,5(5)
		0,4045	0,04	1,1(-13)		130	4,2(6)
Ca	40	0,4227	6,7	3,6(-11)	6,5(-5)	0,78	2,5(4)
Ca ⁺	40	0,3968	0,15	6,5(-12)	1(-8)	35	1,1(6)
		0,3934	0,30	1,3(-11)		17	5,6(5)
Fe	56	0,3860	0,034	3,9(-13)	5(-7)	210	4,9(6)
		0,3720	0,077	1,3(-12)		95	2,2(6)
Sr	88	0,4607	2,4	8,7(-12)	2,2(-4)	4,8	7,0(4)
Sr ⁺	88	0,4216	0,32	1,5(-12)	4,0(-8)	36	5,2(5)
		0,4078	0,44	2,3(-12)		26	3,8(5)
Cs	133	0,8944	9,7	2,6(-11)	4,0(-4)	1,8	1,7(4)
		0,8521	27	7,3(-11)		0,6	6,2(3)
		0,4593	0,25	1,1(-12)		69	6,7(5)
		0,4555	0,11	5,1(-13)		160	1,5(6)
Ba	138	0,5535	20	6,8(-11)	6,1(-4)	0,9	8,4(3)
Ba	138	0,4934	3,6	1,5(-11)	1,1(-7)	5	4,6(4)
		0,4554	6	3,0(-11)		3	2,8(4)
Eu	152	0,4661	1,8	8,1(-12)	5,0(-4)	11	9,3(4)
		0,4627	2,8	9,6(-12)		10	8,4(4)
		0,4594	2,3	1,1(-11)		8,6	7,3(4)
Eu ⁺	152	0,4205	0,56	3,6(-12)	1(-7)	35	3,0(5)
		0,4130	0,31	2,0(-12)		64	5,4(5)
H ₂ O	18				1(-5)	2900	1,9(8)
H ₂ O ⁺	18	0,6158	0,06	8,7(-14)	1(-5)	39	2,5(6)
AlO	43	0,4650	0,04	1,2(-13)	1,4(-7)	140	4,2(6)

Процесс рекомбинации ионов металлов $[X^+]$ происходит в основном через реакции тройных соударений с образованием молекулярных ионов, последующие реакции которых приводят в основном снова к ионам, так как реакция радиоактивной рекомбинации



медленная и имеет коэффициент скорости $\beta \sim 1 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Поэтому практически отношение

$$\frac{[X^+]}{[X]} = \frac{\alpha \cdot [M] + j + D}{\beta \cdot n_e}$$

и составляет в большинстве случаев порядка $10^2 \div 10^4$.

Поскольку многие атомы металлов имеют и флуоресцирующие ионы, то это позволяет измерять это соотношение экспериментально.

2. Процессы рассеяния света

В области минимума температуры, вблизи мезопаузы (высота около 90 км), иногда при определенных условиях (наличие водяного пара, ядер конденсации) появляются необычно светящиеся облака, имеющие тонкую структуру, состоящую из кристалликов льда, и серебристо-голубоватый цвет. Это самые высокие облака в атмосфере Земли, получившие за свой цвет название серебристых /2,3/. Естественная концентрация водяного пара на этих высотах составляет порядка $10^8 + 10^9 \text{ см}^{-3}$. При таких концентрациях образование мелких ледяных кристалликов при температуре выше 150 К не происходит.

Для того, чтобы при температурах, типичных для области мезопаузы (как правило, выше 150 К), возник процесс конденсации водяного пара в кристаллы льда, необходима значительно большая концентрация водяного пара.

В табл.2 на основе модели атмосферы CIRA-72 /29/ приведено распределение температуры по высоте в области мезопаузы для различных сезонов года. Там же показаны соответствующие давления насыщенных паров воды над льдом (Р, мм рт.ст.), рассчитанные согласно значению концентраций молекул воды, необходимых для выполнения условия кристаллизации воды в лед. Из данных таблицы видно, что в нормальных условиях серебристые облака могут образовыв-

Концентрации паров воды, необходимые для конденсации
в условиях мезопаузы

Высота, км	З и м а			Равноденствие			Л е т о		
	Т,К	P _{H₂O} , мм.рт.ст.	H ₂ O, см ⁻³	Т,К	P _{H₂O} , мм.рт.ст.	H ₂ O, см ⁻³	Т,К	P _{H₂O} , мм.рт.ст.	H ₂ O, см ⁻³
70	227	4,46(-2)	3,4(15)	222	2,5(-2)	1,9(15)	217	1,4(-2)	1,06(15)
80	212	7,08(-3)	5,4(14)	198	1,0(-3)	7,6(13)	164	1,26(-6)	9,6(10)
90	205	2,6(-3)	1,97(14)	187	1,5(-4)	1,14(13)	150	3,16(-8)	2,4(9)
100	213	7,9(-3)	6,0(14)	212	7,08(-3)	5,4(14)	214	8,9(-3)	6,7(14)

ваться только в летний период года, когда температура в мезосфере может понижаться до 150 К и ниже. Для других температур необходимо большее количество воды, значительно превышающее её естественное содержание. Кроме того, известно, что даже при наличии перенасыщения не весь водяной пар переходит в лед (одной из возможных причин этого может быть недостаток ядер конденсации) /2,3/.

Масса воды, содержащаяся в насыщенном паре в объеме атмосферы с основанием S и высотой, равной высоте однородной атмосферы H, может быть определена с помощью выражения:

$$m_{H_2O} = S \cdot H [H_2O]_s \cdot M_{H_2O} \cdot n_H = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H \cdot [H_2O] \cdot M \cdot n_H,$$

где D - диаметр пятна; H = 6 · 10⁵ см (для области мезосферы); [H₂O] - концентрация паров, см⁻³; M_{H₂O} - молекулярная масса воды, M_{H₂O} · n_H - масса молекулы воды, равная 3,0 · 10⁻²³ г. При D = 10 см и естественной концентрации воды около 10⁸ см⁻³ m_{H₂O} = 140 кг.

Как и флуоресценция, рассеяние света ледяными кристаллами может появляться только в освещенной области высот атмосферы.

Используя данные табл.2 для различных сезонов года и сведения о размерах наблюдаемых светящихся облаков, можно легко оценить необходимое количество воды, требуемое для образования кристалликов льда и связать его с запуском ракет различной мощности. Естественно и ожидать, что области повышенного содержания паров воды могут иметь ограниченные размеры, но порядка сотен километров.

Согласно исследованиям серебристых облаков, средний размер рассеивающих частиц составляет 10^{-5} см [18]. Если сделать предположение, что весь водяной пар превращается в кристаллические частицы (что заведомо преувеличено), то отношение концентрации частиц льда n к концентрации паров воды H_2O будет равно:

$$n/H_2O = 6 \cdot 10^{-8}.$$

Однако поскольку реальные значения $n \sim 1$ см $^{-3}$, то и скорее всего

$$n/H_2O \sim 10^{-8}.$$

Из данных работ [2,3] также следует, что коэффициент рассеяния такой частицы составляет $\sigma \sim 5 \cdot 10^{-11}$ см 2 .

Отсюда интенсивность рассеянного излучения равна:

$$I_{H_2O} = 10^{-8} \sigma \cdot N [H_2O] \cdot F,$$

где $F = 1,3 \cdot 10^{17}$ фотон \cdot см $^{-3} \cdot$ с $^{-1}$ – интенсивность излучения Солнца в видимой области спектра. Таким образом, если распылить m_{H_2O} (грамм) воды в виде пятна размером D (см), то при обеспечении условий конденсации можно ожидать интенсивность рассеянного излучения во время сумерек в виде:

$$I = 3 \cdot 10^{15} \cdot \frac{m_{H_2O}}{D} \text{ (рэлей)}.$$

Для указанных выше условий яркость свечения будет составлять 4 мегарэлей, что в 40 раз превышает яркость неба на зенитном угле 40° при визировании в азимуте Солнца, угол погружения которого под горизонт составляет 10° .

3. Процессы хемиллюминесценции

Хемиллюминесценция – вид свечения, который может обусловлен запуском и полетом изделия ракетно-космической техники. Он менее интенсивен, чем флуоресценция, и может быть зарегистрирован с поверхности Земли только в ночное время. Ночные условия наблюдения хемиллюминесцентного свечения могут быть определены согласно [17].

Остановимся на свечении, связанном с молекулами окиси азота, кислорода и водорода. В верхней атмосфере континуальное с

зеленым оттенком свечение образуется в результате реакции, предложенной В.И.Красовским /13/ для атмосферных условий:



В дальнейшем молекула NO_2 быстро разрушается с восстановлением молекулы NO по реакции:



Н.Н.Шеффовым /24/ было получено распределение по спектру континуального излучения ночного неба для атмосферной и внеатмосферной составляющих. Континуум, обусловленный только NO , был рассмотрен В.Г.Соболевым /19/, давшим оценку его интенсивности в 5–10 рэлей/нм в видимой области спектра. В работах /28,32/ представлен результат лабораторных исследований непрерывного свечения, вызванного NO , и получено распределение энергии по спектру излучения.

Для того, чтобы континуум, связанный с продуктами сгорания азотосодержащего ракетного топлива, превышал естественный, необходимо выполнение условия:

$$[\text{NO}]_{\text{искусств.}} \geq [\text{NO}]_{\text{естеств.}}$$

Квадратные скобки обозначают концентрацию. Наибольшую интенсивность естественное континуальное излучение имеет на высотах максимума концентрации атомарного кислорода, т.е. около 90–100 км.

Интенсивность I непрерывного свечения, обусловленного выбросами, может быть представлена как

$$I = [\text{NO}] \cdot [\text{O}] \cdot \alpha_{16} \cdot H,$$

где $[\text{NO}] \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$; $[\text{O}] \approx 4,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$; α_{16} – коэффициент скорости реакции, равный $6,4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} / 28,34/$; H – высота однородной атмосферы, равная $6 \cdot 10^5 \text{ см}$. Подставляя указанные значения, получим:

$$I = 1,6 \cdot 10^9 \text{ фотон} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} = 1,6 \text{ килорэлей.}$$

Количество естественной окиси азота m_{NO} , обеспечивающее фоновую интенсивность свечения, может быть вычислено по соотношению:

$$m_{\text{NO}} = M_{\text{NO}} \cdot m_{\text{H}} \cdot [\text{NO}] \cdot H \cdot S \text{ (г)},$$

где $M_{\text{NO}} \cdot m_{\text{H}}$ – масса молекулы NO , равная $5 \cdot 10^{-23} \text{ г}$, M_{NO} – молекулярная масса молекулы NO , S – площадь свечения с диаметром D . Если $D = 10 \text{ см}$, то $m_{\text{NO}} = 240 \text{ кг}$.

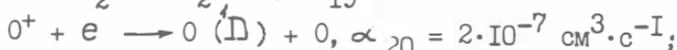
Выше уже отмечалось, что молекулы NO_2 быстро восстанавливаются в NO , поэтому концентрация NO в ночное время практически сохраняется на исходном уровне. Постоянная времени восстановления τ определяется соотношением:

$$\tau = \frac{1}{\alpha_{14} [\text{O}^+]},$$

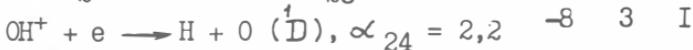
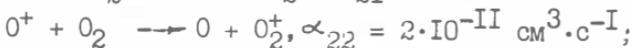
где α_{14} - коэффициент скорости реакции, равный $3,2 \cdot 10^{-11}$, $\text{exp}(-300/T) \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

При $T = 200 \text{ K}$ (характерной для мезопаузы) и $\alpha_{14} = 7 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ величина $\tau = 0,34 \text{ с}$. Таким образом, чтобы искусственное хемиллюминесцентное свечение превышало естественное, необходима инъекция окиси азота не менее 240 кг , что является вполне реальным.

В верхней атмосфере (область высот $250-300 \text{ км}$), где преобладают положительные ионы атмосферного кислорода, возникает красная эмиссия ($630,0 \text{ нм}$) атомарного кислорода из метастабильного состояния ^1D . Возбуждение кислорода и его излучение происходит по следующей цепи реакций:



Естественная интенсивность этой эмиссии (I_{6300}) при отсутствии полярных сияний около 100 рэлей ($10^8 \text{ фотон} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), однако она может усиливаться за счет инъекций в верхнюю атмосферу углекислого газа, образующегося при работе ракетных двигателей, а также за счет выброса избыточного кислорода и водорода. В этих случаях дополнительная интенсивность красной эмиссии возникает за счет реакций /30,34,35/:



Обозначим естественную концентрацию молекулярного кислорода через $[\text{O}_2]$

образованию дополнительного кислорода, через $[X]$. В этом случае заметное усиление интенсивности красной эмиссии произойдет при условии:

$$[X] \alpha_x \gg [O_2] \cdot \alpha.$$

Таким образом, если требуется зарегистрировать значительное усиление интенсивности 630,0 нм, необходимо, чтобы интенсивность дополнительного свечения (I_x) в несколько раз n превосходила фоновую I_{6300} (100 рэлей), то есть:

$$\frac{I_x}{I_{6300}} = \frac{[X] \cdot \alpha_x}{[O_2] \cdot \alpha} = n. \quad (I)$$

Оценим теперь значение полной массы естественного молекулярного кислорода m_{O_2} , содержащегося в некотором светящемся объеме атмосферы с основанием, имеющим диаметр D , и массы газов (CO_2 , O_2 , H_2), искусственно поступающих в светящийся объем и способствующих образованию дополнительного кислорода.

Среднее значение высоты однородной атмосферы для рассматриваемых компонент и для данной области высот ($\sim 250-300$ км) равно $5 \cdot 10^6$ см. Таким образом,

$$m_{O_2} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot [O_2] \cdot M_{O_2} \cdot m_H \cdot H}{4}; \quad (2)$$

$$m_x = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot [X] \cdot M_x \cdot m_H \cdot H}{4}, \quad (3)$$

где массы соответствующих молекул (CO_2 , O_2 , H_2) равны $M_{O_2} \cdot m_H = 5,3 \cdot 10^{-23}$ г; $M_{CO_2} \cdot m_H = 7,3 \cdot 10^{-23}$ г; $M_{H_2} \cdot m_H = 3,3 \cdot 10^{-24}$ г.

Отношения их полных масс должны удовлетворять условию:

$$\frac{m_x}{m_{O_2}} = \frac{[X] \cdot [M_x]}{[O_2] \cdot [M_{O_2}]}$$

или, используя выражение (I), получим:

$$\frac{m_x}{m_{O_2}} = n \cdot \frac{M_x}{M_{O_2}} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_x}$$

Подставляя значения масс молекул и соответствующих скоростей реакций, имеем:

$$\frac{m_{CO_2}}{m_{O_2}} = 1,02; \quad \frac{m_{O_2}}{m_{O_2}} = n; \quad \frac{m_{H_2}}{m_{O_2}} = 6,2 \cdot 10^{-4}. \quad (4)$$

Для оценки полученных результатов целесообразно рассмотреть следующий пример. Свечение 630,0 нм ночного неба имеет пятнообразную структуру с диаметром $\sim 5 \cdot 10^7$ см. Типичное значение концентрации молекулярного кислорода для высот 250–300 км около $2 \cdot 10^7$ см⁻³. Тогда, согласно выражению (2), $m_{O_2} = 10$ т. Для того, чтобы интенсивность красной эмиссии увеличилась, предположим, что в $n = 10$ раз необходима дополнительная инжекция в соответствии с рассмотренными соотношениями (4):

$$CO_2 - 100 \text{ т}; \quad O_2 - 100 \text{ т}; \quad H_2 - 0,063 \text{ т}.$$

По-видимому, в пределах указанной вариации интенсивности излучения 630,0 нм наиболее существенное влияние оказывает выброс водорода. Более точные выводы можно сделать, используя конкретные сведения о наблюдаемых размерах светящихся пятен эмиссии 630,0 нм, сопровождающих запуски ракет.

4. Экологические интерпретации

Как видно из проведенного исследования, совершенно очевидна экологическая значимость воздействия на верхнюю атмосферу. Охарактеризованные три вида свечения в верхней атмосфере, в своем естественном режиме возникновения и исчезновения, представляют собой прямую информацию о физико-химическом характере процессов на указанной высоте. Эти свечения могут стимулироваться либо космогенными причинами (геомагнитные возмущения при геоэффективных вспышках на Солнце, метеорный приток вещества), либо планетарными (вулканическая деятельность, ионосферные возмущения над тектонофизическими напряженными зонами). Но по мере наращивания числа активного воздействия на околоземное космическое пространство в настоящее время регистрируется нарастание частоты и интенсивности свечений, что требует дополнительных усилий по диагностике этого свечения и свидетельствует о возможном глобальном видоизменении физико-химических условий, по крайней мере, в регионах локализации технических воздействий на ближний геокосмос.

Имеется два основных вида воздействия постороннего вещества

на геокосмос: специальная инъекция химических элементов, выделение продуктов сгорания ракетного топлива и работа двигателей на орбитах (челночные системы).

Химически активные реагенты, инжектируемые из ракет, включают в себя: натрий, триметилалюминий, окись алюминия, окись азота, двуокись углерода, воду, стронций, цезий, барий и др. Данный набор веществ обеспечивает процесс искусственной стимуляции свечений и генерации электрического поля при дрейфе ионов поперек магнитного поля от места выброса. Ночные эксперименты прямо связаны с инъекцией хемиллюминесцентных облаков (триметилалюминий). Например, в эксперименте Lagopedo в ионосфере низких широт было выброшено: $1,5 \cdot 10^{27}$ молекул H_2O ; $1,5 \cdot 10^{26}$ CO_2 ; $6,6 \cdot 10^{26}$ H_2 /20/. Измеряемые изменения ионного состава наблюдались в виде пятна в диаметре до 80 км на высоте 261 км.

На высоте около 250 км могут флуоресцировать ионы H_2O^+ , время свечения составляет $5 \cdot 10^2 + 5 \cdot 10^3$ с. Причиной возникновения свечения на больших высотах за счет излучения ионов воды является флуоресценция (см. табл. I). Эти ионы H_2O^+ образуются путем ионообменной реакции:



коэффициент скорости которой составляет $\alpha_{32} = 2,3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1} / 16,38/$. Оценка содержания H_2O (см. табл. I) сделана на основе данных работы /14/.

Масштаб разового выброса воды в верхнюю атмосферу можно проиллюстрировать запуском ИСЗ HEAO-C от 20.09.79 г. с помощью ракеты-носителя Atlas/Centaur, когда в атмосферу было выброшено $7 \cdot 10^{29}$ молекул H_2O и H_2 . При этом интенсивность эмиссии 630,0 нм в "дыре" (площадь с размерами запад-восток около 3 тыс. км и юг-север около 800 км) составила 8300 рэлей (фоновое 100 рэлей), а эмиссия 557,7 нм с 300 рэлей возросла до 900 /20/.

Основным механизмом технического воздействия на геокосмос является ракетная доставка веществ в весьма чувствительную область верхней атмосферы. Локальное загрязнение избыточным веществом осуществляется на низких, средних и больших высотах применением высоко грузоподъемных носителей челночного типа ("Шаттл", "Энергия") /4,33/. При этом происходят крупномасштабные возмущения в ионосфере путем прожигания канала пролета выхлопной струей

Выбросы ракетных двигателей за один старт

Носитель	Химические соединения					
	Хлор, хлористый водород (т)	Оксиды азота (т)	Оксиды углерода (т)	Вода, водород (т)	Оксиды алюминия (т)	Общий вес (т)
"Энергия"	0	0	740	750	0	1490
"Шаттл"	187	7	378	346+166	177	1261
Сумма реактивов	187	7	1118	1262	177	2751

двигателя и тепловым сигналом бегающего потока с факельной струей.

Системы челночного типа обозначили собой новый этап техногенного преобразования геокосмоса в направлении усиления искусственных процессов в верхней атмосфере. Следует учитывать и учащуюся работу двигателей для корректировки орбит, стыковок, расстыковок, слив топливных ингредиентов. При этом надо отметить и общее число пусков, превышающее десятки тысяч. Анализируя выбросы одного пуска "Шаттл" и "Энергия", обратимся к табл.3, приведенной в работе /4/. В контексте данной работы существенно напомнить, что заметные усиления хемиллюминесценции локальных участков верхней атмосферы происходят при попадании в эти участки оксидов азота 240 кг, CO_2 - 100 т, O - 100 т и H_2 - 63 кг. Легко видеть, что один залп ("Шаттл" + "Энергия") большегрузных носителей на целые порядки превышает количественные оценки стимуляторов хемиллюминесценции.

На высоте около 100 км флуоресцируют главным образом Li, Na и AlO, причем длительность существования свечения составляет $10^4 + 10^5$ с. Наряду с техногенной доставкой этих ингредиентов на данную высоту следует учитывать и космогенный приток, особенно в отношении

чаев прямо коррелирует с вулканической активностью и высотными ядерными взрывами /7,26/. Отмечалось воздействие вулкана Эль-Чичон на содержание водорода в верхней атмосфере после его извержения 3 марта 1982 г. /15/.

Таким образом, по мере нарастания техногенного воздействия на ближний геокосмос растет вероятность возникновения крупномасштабных новообразованных процессов, представляющих собой отклик на преобразование высокочувствительной природной среды верхней атмосферы, как это можно проследить из данных работ /1, 18/. Эти процессы могут проявляться посредством учащающихся образований /9/, и изучение их функциональной роли является важной задачей, в особенности в связи с непредсказуемостью их образования и последствий.

5. Литосферные вклады в свечимость верхней атмосферы

Помимо вышеохарактеризованных причин нарастания интенсивности свечения верхней атмосферы целесообразно дать краткое сообщение о возможном энергетическом вкладе литосферного электромагнетизма в процесс свечения. Общеизвестный факт контроля локализации полярных сияний со стороны глубинных разломов в авроральных зонах дополняется наблюдениями и низкоширотного характера. Особенно ярким примером локализации сияния над подновляющимся глубинным разломом Теректинского хребта (Горный Алтай) является сияние в октябре 1981 г., после геоэффективной вспышки на Солнце /5/.

При подробном изучении развития средне- и низкоширотного сияния в северном полушарии А.Н. Дмитриевым /5/ обнаружен ранее неизвестный факт возможной максимизации полярного сияния в средних широтах при очень сильных геомагнитных возмущениях в тектонофизических напряженных зонах. Рассматриваемый пример участия напряженной Катунско-Теректинской динамопары в локализации крайне интенсивного свечения (наблюдалось даже днем при ясной погоде), стимулированного вспышкой Солнца, позволяет делать вывод о том, что, во-первых, тектонофизически напряженные структуры Алтая "чувствительны" к геоэффективным вспышкам и, во-вторых, вертикальный энергопереток в таких районах способствует подготовке верхней атмосферы к переходу в возбужденное состояние до космогенной стимуляции в виде скоростных потоков.

Также все чаще появляются регистрации аномальных возму-

щениях ионосферы вблизи (а иногда и вдали) от сейсмонагруженных районов. Отслеживание литосферно-ионосферных связей /8,18/ можно проводить и не только на уровне экстремальных значений регистрируемых параметров. Амплитудно-временные характеристики параметров литосферно-ионосферных связей могут изучаться как звенья солнечно-земных взаимосвязей и сейсмоионосферных явлений. Поэтому ограничивать изучение наращивания интенсивности свечения верхней атмосферы ранее охарактеризованными причинами не следует. Могут быть долгодействующие причины как космического характера (например, аномальные процессы в ионосфере в период подготовки взрыва на р.Тунгуска в 1908 г. /6/), так и глубинные литосферные (пример подготовки землетрясений в рифтовых зонах Байкала). Такие подготовки электрохарактеристик атмосферы /10/ рассматриваются в квазистатическом приближении и как случай краевой задачи. Но для нас важен не сценарий решения задачи, а полученный вывод, по которому следует, что:

а) существует реальная передача электронов в ионосферу при поверхностных напряжениях на уровне фоновых, т.е. $10^2 + 10^4$ В/м (отметим, что в ряде мест вариации атмосферного электричества достигают десятков тысяч вольт);

б) учет пространственно-временных масштабов явлений вертикального перетока энергии ЭМИ позволяет откартировать особо "электрофильные участки".

Принимая во внимание, что постоянная времени атмосферы в зависимости от метеоусловий имеет $\tau_0 \approx 2,5 \cdot 10^4 - 10^{-3}$ с, становится очевидной невозможность раскачки среды при $\tilde{\tau} \ll \tau_0$. Воздействие на ионосферу возможно при параметрах атмосферы $H \approx 50-100$ км по мощности и L по протяженности, т.е. требуется, чтобы

$$\tilde{\tau} \geq \tau_0 \quad \text{и} \quad L \geq H,$$

причем это для фоновых обстановок, а не для мощных импульсов (искусственного или естественного происхождения). Таким образом, ионосферные возмущения могут быть вызваны грозами (с грозовым фронтом до 100 км) или протяженными разломами (например, Теректинско-Башчелакский сбрососдвиг около 160 км). Надо также отметить все еще слабый интерес к проблеме выяснения устойчивости локализаций электроаномалий, без чего трудно строить адекватные модели для зон с вертикальными энергоперетоками /8,18/.

Наличие электрических токовых структур, связанных в один геолого-геофизический комплекс земной коры, все больше привлекает исследователей. В частности, И.Г.Киссин /10/ выявил очень тесную связь высокоамплитудных вариаций с эффектом усиления поля в окрестности локальных магнитных неоднородностей. Если эти неоднородности локализуются в данной тектонофизической зоне достаточно компактно, то создаются условия для организации ионосферного отклика (включая и свечения) как показателя напряженного состояния среды нижнего полупространства. Хорошо отрегистрованы, в частности, спектральные пики на интервалах (мин): 160, 40, 12, 8. Экспоненциальное распределение этих оценок позволяет описать их в виде $\sim \omega^{-\gamma}$, где $\gamma \approx 1,3+1,5$. Эти регистрации и расчеты были поддержаны анализом статистических и спектральных закономерностей поля радиозумов в верхней атмосфере. Хорошая сходимость результатов позволяет делать вывод, что предположение о "чувствительных зонах", характеризующихся интенсивной реакцией геолого-геофизической среды на слабое воздействие, является оправданным. Следовательно, в перечень причин, способствующих наращиванию светимости верхней атмосферы, включаются и процессы вертикального энергоперетока.

Список литературы

1. Балеев И.Б., Гольдин А.А., Гринвальд Е.Г. и др. Глобальное исследование распределения концентрации ионов в ионосфере // Докл. АН СССР. 1976. Т.230, № 5. С.1062-1065.
2. Бронштэн В.А., Гришин Н.И. Серебристые облака. М.: Наука, 1970. 360 с.
3. Бронштэн В.А. Серебристые облака и их наблюдения. М.: Наука, 1984. 128 с.
4. Бурдаков В.П. Сравнительный анализ аэрокосмических разрушителей озона // Химия и жизнь. 1990. № 3. С.15-19.
5. Дмитриев А.Н. Тектоно Горного Алтая // Катунский проект: проблемы экспертизы. Новосибирск, 1990. Ч.П. С.13-15.
6. Дмитриев А.Н. Тунгусский феномен и геомагнитный режим 1908 г. // Актуальные вопросы метеоритики в Сибири. Новосибирск, 1988. С.105-113.

7. Дмитриев А.Н. Техногенный вызов планете Земля // Вест. высш. шк. 1989. № 7. С.38-44.
8. Дмитриев А.Н., Скавинский В.П., Новиков Г.Н. Локальные геофизико-геохимические исследования тектонофизических районов Горного Алтая. Новосибирск, 1989. 40 с. (Препр./ ИГиГ СО АН СССР; № 20).
9. Дмитриев А.Н. Комплексное изучение аномальных явлений // Непериодические быстропротекающие явления в окружающей среде. Томск, 1990. С.24-29.
10. Киссин И.Г. Высокоамплитудные предвестники землетрясений и "чувствительные зоны" земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 6. С.3-13.
11. Ключарев А.Н., Янсон М.Л. Элементарные процессы в плазме щелочных металлов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
12. Кондратьев К.Я. Весенний минимум озона ("Озонная дыра") в Антарктике // Исследования Земли из космоса. 1988. № 2. С.104-118.
13. Красовский В.И. Счет сцинтилляций как метод астрономических исследований // Докл. АН СССР. 1951. Т.78, № 3. С.427-430.
14. Красовский В.И., Рапопорт Э.Ц., Семенов А.И. Новые эмиссии верхней атмосферы как следствие антропогенного воздействия на ионосферу // Космические исследования. 1982. Т.20, № 2. С.237-243.
15. Красовский В.И., Семенов А.И., Соболев В.Г., Шефлов Н.Н. О влиянии извержения вулканов на гидроксильную эмиссию вблизи мезопаузы // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т.29, № 4. С.689-691.
16. Мак-Ивен М., Филлипс Л. Химия атмосферы. М.: Мир, 1978. 376 с.
17. Марцваладзе Н.М., Абуладзе Н.П. Соотношение прозрачности и светимости в верхней атмосфере // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерв. Тбилиси: Мецниереба, 1981. № 54. 149 с.
18. Моргунов В.А. К природе литосферно-ионосферных связей // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 5. С.80-87.
19. Соболев В.Г. Полярные сияния и свечение ночного неба. М.: Радио и связь, 1981. № 29. 192 с.
20. Фаткуллин М.И. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. М.: ВИНТИ, 1982. 224 с. (Итоги науки и техники / ВИНТИ. Сер. Физика ионосферы; т.6).

21. Филипп Н.Д., Ораевский В.Н., Блаунштейн Н.Ш., Ружин Ю.Я. Эволюция искусственных плазменных неоднородностей в ионосфере Земли. Кишинев: Штиинца, 1986. 248 с.
22. Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера. М.: Атомиздат, 1972. 423 с.
23. Цирс Г.П., Логинов Г.А. Особенности недельных ходов геомагнитных колебаний P_{CI} и P_2 // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т.25, № 2. С.153-154.
24. Шефов Н.Н. Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба. М.: Изд-во АН СССР, 1959. № I. 143 с.
25. Шефов Н.Н. Коэффициенты рассеяния фотонов для молекул H_2O^+ // Астрон. журн. 1984. Т.61, № I. С.118-120.
26. Ядерный взрыв в космосе, на Земле и под Землей. М.: Воениздат, 1974. 234 с.
27. Adv.Space Res. 1981. Vol.1, N 2.
28. Banks P.M., Kockarts G. // Aeronomy. N.Y.: Acad.Press., 1973. Part A. 430 p.
29. CJRA-72, COSPAR International Reference Atmosphere. Berlin: Academie-Verlag, 1972. 450 p.
30. Nurad E. // Planet. and Space Sci. 1985. Vol.33, N 4. P.421-423.
31. Nicolet M. // Planet. and Space Sci. Vol 37, N 10. P.1249-1289.
32. Torr M.R. // Geophys. Res. Lett. 1983. Vol.10, N 2. P.114-117.
33. Space Shuttle - "an osone Killer" // Flight Jut. 1989.
34. Schiff H. // Ann. Geogys. 1969. Vol.25, N 4. P.115-127.
35. Zinn J., Sutherland C.D., Stone S.N., et al. // J.Atmos. and. Terr. Phys. 1982. Vol.44, N 12. P.1142-1171.

Утверждено к печати
Институтом геологии и геофизики СО АН СССР

Технический редактор Н.Н.Александрова

Подписано к печати 13.II.90.

Бумага 60x84/16. Печ.л. I, 25. Уч.-изд.л. I; 05.

Тираж 200. Заказ 414. Бесплатно.

Институт геологии и геофизики СО АН СССР
Новосибирск, 90. Ротапринт.