

## ПИЛОТИРУЕМАЯ КОСМОНАВТИКА – ИССЛЕДОВАНИЯМ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (ВЕРХНЕАТМОСФЕРНЫЕ И ИОНОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ)

© 2011 г. С. В. Авакян<sup>1\*</sup>, А. С. Иванченков<sup>2</sup>, В. В. Коваленок<sup>2</sup>, В. П. Савиных<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научный центр “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> ОАО Ракетно-космическая корпорация “Энергия”, Королев Московской обл.

<sup>3</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАуК), Москва

\*E-mail: avak2@mail.ru, avak@soi.spb.ru

Поступила в редакцию 24.12.2010 г.

Обобщены результаты визуально-инструментальных исследований с борта отечественных пилотируемых космических аппаратов “Союз”, орбитальной научной станции “Салют-6” и орбитального комплекса “Мир” новых оптических явлений в верхней атмосфере Земли. Это явления волновой природы – горизонтальная неоднородность эмиссионного излучения верхней ионосферы и локальные быстропротекающие эффекты в свечении полярных сияний – и явление реакции оптических и ионосферных параметров ночной F-области земной ионосферы на солнечные вспышки. Представлены модели физической интерпретации обнаруженных явлений с учетом гелиогеофизических возмущений в космической погоде.

**Ключевые слова:** пилотируемые космические аппараты, орбитальные научные станции, атмосфера Земли, F-область ионосферы, свечение полярных сияний, солнечные вспышки

### ВВЕДЕНИЕ

Начиная с запуска Первого спутника, а еще больше – с полета Ю.А. Гагарина, у человечества появилась возможность исследовать нашу планету и окружающее ее межпланетное пространство как единую систему, в которой взаимосвязаны процессы, явления и образования. Это хорошо подтверждается известным существованием солнечно-земных связей (Авакян, 2008), проявляющихся прежде всего как воздействие активности Солнца на состояние магнитосферы, ионосферы и атмосферы Земли, а также, возможно, на литосферу и биосферу, включая человека (Авакян, 2005). Во многих случаях физика этой связи определяется вкладом солнечных вспышек и геомагнитных бурь на общее возмущение верхней атмосферы и ионосферы. Поэтому исследование оптических явлений в верхней атмосфере Земли с космических аппаратов – одно из самых актуальных направлений космонавтики. Важнейшая роль в решении этой задачи принадлежит пилотируемым космическим полетам (Лазарев и др., 1979, 1981, 1983, 1987). У космонавтов есть возможность выбора как объекта наблюдения, так и наиболее подходящего способа регистрации наблюдаемой оптической картины. Присутствие хорошо подготовленных космонавтов-наблюдателей на борту орбитальных научных станций в длительных экспедициях позволило наиболее рационально поставить работу по поиску и обнаружению неизвестных ранее явлений. Здесь очень эффективными оказались ви-

зуальные исследования различных характеристик собственного эмиссионного излучения верхней атмосферы и, особенно, его пространственных и временных вариаций. Именно такие наблюдения отечественных космонавтов на орбитальных научных станциях “Салют” и орбитальном комплексе “Мир” привели к открытию новых представлений о вариациях в эмиссионном излучении верхней атмосферы и ионосферы, обусловленных воздействием гелиогеофизических возмущений. Статистика таких наблюдений, полученная космонавтами, подтвердила физическую природу вновь обнаруженных явлений как связанную с проявлением оптических процессов в самой верхнеатмосферной плазме, контролируемой потоками ионизирующих и проникающих излучений различной космической природы.

Наиболее плодотворные визуальные наблюдения проведены в верхней ионосфере Земли (ее F-области), там, где проходят орбиты всех пилотируемых космических полетов. Именно здесь получены самые важные, хотя и неожиданные, результаты, неизвестные до этого, несмотря на многочисленные измерения, проведенные специальной оптико-электронной аппаратурой с автоматических спутников и с наземных радиофизических и оптических обсерваторий. При этом проявились известные преимущества оптических исследований верхней атмосферы с борта орбитальных станций: отсутствие оптических помех от плотных слоев нижней атмосферы и возможности визирования вдоль излучающих

областей в направлении наибольших оптических толщин и контрастов.

Знания морфологии и физики процессов F-области ионосферы важны как для решения многих практических задач (прежде всего радиосвязи), так и для научного моделирования всего комплекса солнечно-земных связей. Свечение этой области – точный индикатор не только состояния ее самой, но также степени солнечной и геомагнитной активности (Авакян, 2008; Лазарев и др., 1981, 1983, 1987; Авакян и др., 1994).

### НАБЛЮДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ВОЛНОВОЙ ПРИРОДЫ

Первым явлением, открытым отечественными космонавтами, была горизонтальная неоднородность верхней атмосферы Земли в сумеречной зоне, названная “вертикально-лучевой структурой” (Береговой и др., 1972а, 1972б). Однако это термин скорее “отличительный”, чем описательный, – он не отражает сути наблюдаемой картины. Несколько позднее (Лазарев, Авакян, 1975; Авакян и др., 1977, 1981) стало очевидным, что наиболее правильным объяснением причин горизонтальной оптической неоднородности является наличие внутренних акустико-гравитационных волн (АГВ), модулирующих все основные верхнеатмосферные и ионосферные параметры. Первые наблюдения этого явления проведены в 1968–1970 гг. в полетах пилотируемых космических кораблей “Союз-3, -4, -9” (Береговой и др., 1972а, 1972б; Лазарев и др., 1979).

В работах (Лазарев, Авакян, 1975; Авакян и др., 1977, 1981) впервые после отбора случаев наблюдений вне зон полярных сияний (и с учетом опыта космонавтов по выделению картин таких сияний) дано объяснение горизонтальной оптической неоднородности с учетом наличия АГВ, особенно сильных в сумеречной зоне, где их генерации способствует сверхзвуковое движение терминатора (Авакян и др., 1981). Повышенные до 10–20%, а иногда и до 50% от средней плотности верхнеатмосферной среды, значения амплитуд АГВ с ИСЗ Explorer-32 (на высотах 286–500 км) наиболее часто регистрировались именно в поздние вечерние и ранние утренние часы (Newton et al., 1968, 1969; Dyson et al., 1970). Длина волны составляет 130–500 км, а фазовые плоскости волн располагаются вдоль параллелей, а значит, вдоль направления лучей восходно-заходного Солнца. Вот почему лучше всего горизонтальная оптическая неоднородность в эмиссионном излучении верхней атмосферы проявляется в сумеречной зоне. И условия ее визуальной регистрации с борта пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций в этой зоне наилучшие. Космонавт находится в тени Земли, его зрение хорошо адаптировано, а горизонтальный контраст яркости наблюдается от освещенной солнечным УФ-излучением верхней атмосферы, где действуют все

самые сильные механизмы возбуждения – фотоэлектронами и при фотодиссоциации.

После опубликования результатов наблюдений космонавтов (Береговой и др., 1972а, 1972б) подробные исследования волновых вариаций верхнеатмосферных оптических эмиссий проводились неоднократно (Авакян и др., 1975, 1977, 1981; Dyson et al., 1974; Mullaney et al., 1972; Armstrong, 1975). При этом подтвердились не только возможность приборной регистрации факта присутствия АГВ во всем диапазоне высот от мезосферы до верхней ионосферы как оптическими, так и радиофизическими методами, но и хорошая пространственная корреляция в вариациях интенсивности отдельных эмиссионных линий основного излучающего газа – атомарного кислорода (Dyson et al., 1974; Mullaney et al., 1972; Armstrong, 1975). Эти экспериментальные данные, как и специально разработанная теоретическая модель эмиссионных излучений верхней атмосферы в условиях прохождения АГВ (Авакян и др., 1975), подтвердили, что оба ключевых, для возможности визуальной регистрации с космической орбиты, параметра: уровень яркости поля излучения и оптические контрасты в провале и пучности АГВ – существенно перекрывают пороговую и контрастную чувствительность человеческого глаза (Авакян, 1997). Однако в самой схеме наблюдения важная роль остается за ракурсом – линия визирования должна находиться вдоль плоскости равной фазы соответствующей АГВ (Авакян и др., 1982).

Наблюдения волновой структуры в виде крупномасштабных пульсаций яркости полярного сияния также были впервые выполнены в пилотируемом космическом полете на орбитальном комплексе “Мир”. Эти пульсации 15 января 1988 г. зарегистрировал космонавт В.Г. Титов (Авакян и др., 1991) над большой площадью США и Канады у береговой черты Атлантического океана. В сиянии II балла были видны пульсации яркости с периодом около 0.1 с типа “бегущей волны”, перемещающейся от Флориды в северном направлении на длине порядка 1000 км. Наблюдалась картина, в которой “максимум яркости бежит как световая волна, как будто под пеленой перемещается широкий прожекторный луч”. В этот период наблюдалась сильная мировая магнитная буря, так что было типичное пульсирующее сияние, для которых по наземным наблюдениям известна частота наибольшей амплитуды как раз около 10 Гц. Однако столь быстрые и масштабные пульсации наземными наблюдателями обычно не регистрируются, и лишь после наблюдений В.Г. Титова опубликованы первые результаты регистрации сверхбыстрых волн в полярных сияниях над Антарктикой (Авакян и др., 1991).

**Таблица 1.** Гелиогеофизическая ситуация в периоды наблюдения второго эмиссионного слоя в 1978 и 1981 гг.

Дата и время (UT) видимого свечения F-области	Трехчасовой индекс $K_p$	Время (UT) и балл солнечной вспышки в $H\alpha$	Время (UT) начала ВИБ	Предшествующие мировые магнитные бури		Знак сектора ММП в предыдущие сутки	Последующие мировые магнитные бури	
				Дата	$K_{max}$		Дата	$K_{max}$
14 августа 1978, 00:45–00:50	2 <sup>+</sup>	00:02–00:48, 1F	00:06	11–14 августа	7	+/-	17–20 августа	7
28 октября 1978, 20:30–21:05	1	20:01–21:04, SB	20:11	26–27 октября	7	То же	29–31 октября	8
28 октября 1978, 22:44	3 <sup>-</sup>	22:28–22:44, SB	22:31	То же	7	»	То же	То же
3 мая 1981, 00:38	1 <sup>+</sup>	00:22–00:46, SF	–	1–2 мая	4	-/+	8–12 мая	»
3 мая 1981, 15:52–15:56	1	15:49–16:08, SN	15:47	То же	4	То же	То же	»

### ОБНАРУЖЕНИЕ РЕАКЦИЙ НОЧНОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Наиболее интересные и важные для физики солнечно-земных связей результаты были получены при исследовании причин спорадических возрастных интенсивности визуального свечения ночной F-области ионосферы (Авакян и др., 1984). Обычно ночная F-область ионосферы визуально, в виде второго эмиссионного слоя, хорошо регистрируется с борта низкоорбитального космического корабля (при визировании вдоль излучающего слоя) только на экваториальных широтах (Гречко и др., 1981). Кроме того, в периоды мировых магнитных бурь происходит резкое расширение зон полярных сияний к низким широтам, иногда до 30° геомагнитной широты. Тогда полярное сияние наблюдается на средних и даже низких широтах. Если в спектре выпадающих в верхнюю атмосферу частиц содержатся электроны или протоны сравнительно малых энергий, то и в этом случае возможно интенсивное излучение F-области. Однако космонавты уверенно различают картину полярного сияния (Авакян и др., 1975, 1977, 1981; Лазарев и др., 1981, 1983, 1987). Кроме того, среднеширотные сияния возможны только при сильной геомагнитной возмущенности. Основной экипаж второй экспедиции на орбитальной научной станции “Салют-6” в составе космонавтов В.В. Коваленка и А.С. Иванченкова в июне–октябре 1978 г. впервые обнаружил возрастание яркости этого свечения на ночной стороне в периоды солнечных вспышек при исследовании временных вариаций видимого свечения верхней атмосферы на средних широтах на высотах F-области (второго эмиссионного слоя) от 250 до 350 км. Явление заключается в следующем. Неоднократно в этом и следующем полетах В.В. Коваленка и В.П. Савиных (в мае 1981 г.) наблюдались свечения ночной F-области ионосферы

на всех широтах, т.е. в планетарном масштабе. Обычно такое свечение возникало на период в несколько минут, но 7 и 9 июля 1978 г., а также 16–17 сентября 1978 г. оно зафиксировано почти на каждой ночной стороне витка. Космонавты также отметили, что такое планетарное свечение F-области ионосферы предшествовало мировым магнитным бурям, так как через сутки, иногда через несколько суток, каждый раз наблюдались сильные полярные сияния, в том числе на средних широтах (Лазарев и др., 1981, 1987).

Всего зафиксировано пять случаев отдельных (кратковременных) наблюдений планетарного свечения F-области и четыре случая многократных (суточных) наблюдений – см. табл. 1 и 2 (Авакян и др., 1984). В этих таблицах приведены также основные данные по гелиогеофизическим событиям в периоды наблюдения явления. Ограничение во времени наблюдения каждого из пяти случаев, представленных в табл. 1 по сравнению с длительностью солнечной вспышки, связано, как показывает специальное рассмотрение, лишь с условиями визуальной регистрации слабых свечений с борта орбитальной станции (из-за выхода ее из ночного в зоревый сегмент). Данные обеих таблиц использованы для выявления характерной гелиогеофизической ситуации, сопутствующей обнаруженному явлению:

- в период свечения геомагнитная активность ниже средней (планетарный индекс геомагнитной активности  $K_p \leq 3$ );
- за сутки и более всегда наблюдалась сильная мировая магнитная буря;
- в предыдущие сутки всегда дважды происходила смена сектора межпланетного магнитного поля (ММП) (порядок последней смены знаков приведен в табл. 1 и 2);

**Таблица 2.** Гелиогеофизическая ситуация в периоды наблюдений второго эмиссионного слоя (суточные периоды в 1978 г.)

Дата видимого свечения F-области	Средний трехчасовой $K_p$ за 1 сут	Количество ВИБ за 1 сут	Предшествующие мировые магнитные бури		Знак сектора ММП в предыдущие сутки	Последующие мировые магнитные бури	
			Дата	$K_{max}$		Дата	$K_{max}$
7 июля	3 <sup>-</sup>	9(3)	3–7 июля	8	–/+	13–15 июля	6
9 июля	2	14(7)	То же	То же	То же	То же	То же
16 сентября	2 <sup>-</sup>	5(1)	11–13 сентября	5	+/-	20–21 сентября	3
17 сентября	То же	8(1)	То же	То же	То же	То же	То же

Примечание. В скобках указано число ВИБ, сопровождающих солнечную вспышку с увеличенным потоком рентгеновского излучения.

– через сутки и более всегда отмечалась новая мировая магнитная буря, а космонавты фиксировали появление среднеширотных полярных сияний.

Оказалось также, что тип начала предшествующей и последующей магнитных бурь был всегда одинаков, при этом для постепенного начала между окончанием предыдущей и возникновением новой бури проходило 3–4 дня, а в случае внезапного начала вдвое больше – 7–8 дней. Это обстоятельство и приводит к некоторой неопределенности указанных выше промежутков (1 сут и более) между временем наблюдения свечения и предшествующей и последующей магнитными бурями.

Каждый раз планетарное свечение ионосферы наблюдалось в периоды вспышек на Солнце, которые также характеризуются рядом особенностей:

– по данным наземных обсерваторий, наблюдающих вспышки в линии  $H_{\alpha}$  ( $\lambda = 656.3$  нм), она классифицируется обычно как слабая (субвспышка);

– возникающие при этих вспышках внезапные ионосферные возмущения – ВИБ (на дневной стороне) имеют низкий балл ( $1^{-} \dots 1^0$ ), но регистрируются большим числом ионосферных станций (с достоверностью, близкой к максимальной);

– при патрульных наблюдениях за рентгеновским излучением Солнца в большинстве таких вспышек увеличенного потока рентгеновского излучения (в области спектра 0.05–0.8 нм) не зафиксировано.

Остановимся подробно на выявленной гелиогеофизической ситуации. Невысокий уровень геомагнитной активности (индекс планетарной активности  $K_p \leq 3$ ) подтверждает отсутствие среднеширотных высыпаний электронных и протонных потоков (Авакян и др., 1994) и, следовательно, объяснить наблюдаемое свечение ночной ионосферы полярными сияниями невозможно. Наличие во всех случаях предшествующей магнитной бури свидетельствует о заполнении ближней магнитосферы ионами ионосферного происхождения, в первую очередь двухзарядными ионами кислорода  $O^{++}$  (Авакян, Деминов, 1983; Geiss et al., 1978).

Характер смены знаков ММП подтверждает окончание активного периода после предшествующей магнитной бури, т.е. об определенной стабилизации геофизической погоды перед обнаруженным явлением. Наконец, обязательная последующая сильная мировая буря (буря 20–21 сентября 1978 г. продолжилась сильнейшей бурей 24–25 сентября 1978 г., с  $K_{max} = 7-9$ ) является указанием на то, что рассматриваемые эффекты сопутствуют вспышкам особо повышенной геоэффективности. Действительно, несмотря на то, что в оптическом и рентгеновском диапазонах вспышка на Солнце является очень слабой, она вызывает хорошо фиксируемые, хотя и низкого балла, дневные внезапные ионосферные возмущения. На их величине, по-видимому, сказывается то обстоятельство, что основное возмущение вызывается непатрулируемым УФ-излучением солнечной вспышки, приводящим, главным образом, к возмущениям в F-области ионосферы, не регистрируемым обычно, как ВИБ'ы, наземными ионозондами.

Однако в периоды, указанные в табл. 1, возмущения F-области ионосферы наблюдались мировой сетью ионосферных станций. Это обнаружено в (Авакян и др., 1984; Авакян и др., 1983) по результатам специальной обработки ночных ионограмм. Регистрировались хорошо выраженные увеличения критической частоты F2-слоя на величину до 10%, что соответствует росту плотности тепловых электронов ионосферы на 20%. Это происходило именно в указанные космонавтами периоды наблюдений свечения второго эмиссионного слоя в планетарном масштабе, которым всегда соответствовали солнечные вспышки. Такое проявление воздействия солнечных вспышек на ночную верхнюю ионосферу Земли обнаружено впервые.

Визуальные наблюдения космонавтами повышенного свечения ночной F-области ионосферы количественно подтверждены и приборными наблюдениями за интенсивностью излучения ночной верхней атмосферы Земли, проведенными 6–10 июля 1978 г. в Абастумани, Грузия (Авакян и др., 1985). Эти наблюдения включали регистрацию ра-

диометрами излучения атомарного кислорода верхней атмосферы в красных (630.0/636.4 нм) и зеленой (557.7 нм) линиях. Как известно, на средних широтах красные линии излучаются с высоты 250–350 км, а зеленая – с высоты 90–95 км. Оказалось, что именно интенсивность красных линий возрастает после каждой солнечной вспышки в периоды, указанные космонавтами. Ранее такой эффект в свечении ночного неба не был известен. Эти возрастания достигают 20–25%, а ночью с 8 на 9 июля 1978 г. общий рост в серии вспышек превысил 100%. Существование этого эффекта и его связь с F2-слоем сомнений не вызывают, так как одновременные ионозондовые измерения вариации критической частоты F2-слоя на станции Тбилиси, расположенной менее чем в 200 км от Абастумани, подтверждают ее возрастание в моменты усиления интенсивности эмиссии в спектральных линиях  $\lambda$  630/634 нм.

Такие результаты приборных измерений количественных характеристик реакции ночной верхней ионосферы на солнечные вспышки радиофизическими и оптическими методами позволили построить теоретическую модель данного явления (Авакян и др., 1984; Коваленок, 1988). Она основана на предположении, что основным фактором, ответственным за добавочное ионообразование и оптическое возбуждение ночной F-области ионосферы во время вспышек на Солнце, является увеличение интенсивности рассеянного в геокороне (геокорона – область вокруг Земли на высотах от ~500–1000 км, где еще имеется сильно разряженный газ верхней атмосферы) УФ-излучения этой вспышки. Такое рассеянное на ионах и атомах излучение, проникая в ночную ионосферу, способно производить фотоионизацию всей среднеширотной F-области. Однако теоретический расчет в рамках такой модельной картины (Авакян и др., 1984; Коваленок и др., 1988) потребовал существенного уточнения типовых распределений интенсивности рассеянного излучения геокороны, его угловой анизотропии и временных вариаций интенсивности. Все эти уточнения (Авакян и др., 1984) основаны на анализе совокупности экспериментальных данных как по УФ-радиации геокороны, так и по возрастанию интенсивности отдельных резонансных линий солнечного спектра в периоды вспышек. Было обнаружено, что в предшествующих расчетах ночной фотоионизации верхней атмосферы не учитывалось наличие сильной анизотропии излучения из геокороны и, прежде всего, по зенитному углу. Важно, что все теоретические модели резонансно рассеянной солнечной радиации в геокороне дают очень низкие абсолютные интенсивности (Ogata et al., 1971; Meier et al., 1972; Paresce et al., 1973, 1974), если в качестве значений плотности ионов  $\text{He}^+$  и атомов He используются данные спутниковых экспериментов. Наиболее интенсивное излучение приходит сверху в F-область ночной ионосферы из зоревоего сегмента геокороны при зенитных углах, близких к  $90^\circ$ . Эта

особенность принципиальна при рассмотрении добавочного ионообразования в верхней ионосфере, поскольку ионизирующее излучение с длинами волн ~30–91 нм при зенитных углах  $70^\circ$ – $90^\circ$  целиком поглощается на высоте F-области. Частичное поглощение в F-области происходит и при меньших углах, так что полная интенсивность дошедшего до нижележащей E-области ионосферы УФ-излучения геокороны уменьшается в несколько раз. Главное, в моделях (Авакян и др., 1983, 1984; Коваленок и др., 1988) для рассеянного жесткого УФ-излучения геокороны впервые учтена роль гелиогеофизических условий, прежде всего увеличение самого потока солнечной радиации в резонансных для атомов и ионов геокороны линиях во время солнечной вспышки. Кроме того, принято во внимание существование в первые десятки часов после сильной магнитной бури потока ионов  $\text{O}^{++}$  тепловых энергий из F-области вверх в плазмосферу (Авакян и др., 1983, 1984, 1985; Коваленок и др., 1988). Это приводит к значительному росту плотности ионов  $\text{O}^{++}$  в геокороне – до сотен раз на высотах более, чем 1600 км. Слой  $\text{O}^{++}$  ионов образуется в ионизационно-рекомбинационном цикле с участием ионосферных ионов  $\text{O}^{++}$ , образующихся в верхней ионосфере в основном через двукратную фотоионизацию нейтрального атома кислорода. Этот процесс в ионосфере впервые рассмотрен в (Авакян, 1979) и позднее – в (Victor et al., 1979). Возрастания плотности иона  $\text{O}^+$  также происходят после магнитной бури, но существенно меньше (Авакян и др., 1983). Поэтому, по данным ИСЗ GEOS-1, после бури наблюдается постоянное увеличение отношений  $\text{O}^{++}/\text{O}^+$  и  $\text{O}^{++}/\text{He}$ , и на пятый день они равны 1 на высотах 12000 км (Geiss, Young, 1981), хотя обычно (перед магнитной бурей) значение  $\text{O}^{++}/\text{O}^+$  составляет  $\sim 10^{-3}$  (Geiss et al., 1978; Farrugia et al., 1989). Таким образом, по данным ИСЗ GEOS-1 количество  $\text{O}^{++}$  ионов в геокороне возрастает до 1000 раз. Это подтверждается данными ИСЗ DE-1, когда в среднеширотной геокороне на высотах 15000–22000 км измеренное отношение  $\text{O}^{++}/\text{O}^+$  доходило до 10 раз (Horwitz et al., 1990). Возрастания плотности ионов  $\text{O}^{++}$  и, особенно,  $\text{O}^+$  происходили преимущественно в поздние часы вечерних и утренних сумерек (Roberts et al., 1987).

В (Carlson et al., 1972) рассмотрена возможность переизлучения солнечной радиации в линии 30/4 нм на ночную сторону геокорональными ионами  $\text{O}^{++}$ . Действительно, линия  $\text{O}^{++}$  в переходе  $2s^2 2p^3 P_2 \rightarrow 2s^2 2p 3d^3 P_2^0$  имеет длину волны, равную 30.3799 нм, а  $L_\alpha \text{He}^+$  – 30.3783 нм, т.е. всего на  $1.7 \times 10^{-3}$  нм меньше. Очевидно, что солнечные линии 50.7, 70.3 и 83.4 нм, излучаемые ионами  $\text{O}^{++}$  плазмы солнечной атмосферы, также могут рассеиваться на ионах  $\text{O}^{++}$  геокороны.

**Таблица 3.** Резонансные электронные переходы в ионах  $O^{++}$  и их интенсивности в солнечном спектре и геокороне

$\lambda$ , нм	$f_{ik}$	$\Phi_{\lambda}$ , квант $см^{-2}с^{-1}$	$4\pi I_{O^{++}}/4\pi I_{He^+}$ , %	
			внутри плазмосферы	вне плазмосферы
30.3799	0.11	$5.3 \times 10^9$	} 21.9	67.5
30.3693	0.035	$3.24 \times 10^9$		
30.3621	0.059	$5.95 \times 10^8$		
50.74–50.82	0.19	$8.0 \times 10^7$	1.0	3.0
70.23–70.39	0.18	$2.8 \times 10^8$	3.0	9.0
83.29–83.53	0.15	$4.9 \times 10^8$	4.0	12.0

В табл. 3 приведены данные по электронным переходам в ионах  $O^{++}$  – силы осцилляторов линий и их интенсивности в солнечном спектре (Авакян и др., 1984, 1994). В этой же таблице сделаны оценки возрастания УФ-излучения геокороны за счет рассеяния на ионах  $O^{++}$ . Для приближенных оценок такой вклад можно рассчитать по отношению к резонансному переизлучению линии 30.4 нм на ионах геокороны  $He^+$  и при этом не учитывать эффекты перераспределения интенсивности рассеяния по различным направлениям. Кроме того, можно предположить, что параметры профилей солнечных линий  $O^{++}$  мало отличаются от линии  $L_{\alpha} He^+$ , поскольку все эти эмиссии излучаются в одной и той же части атмосферы Солнца – в ее переходной области. В таком случае величина вклада каждой линии  $O^{++}$  в излучение геокороны по отношению к линии 30.4 нм иона  $He^+$  составляет

$$\frac{4\pi I(O^{++})}{4\pi I(He^+)} = \frac{f_{ik}(O^{++})\Phi_{\lambda} N(O^{++})}{f_{ik}(He^+)\Phi_{30.4} N(He^+)} \times 100\%$$

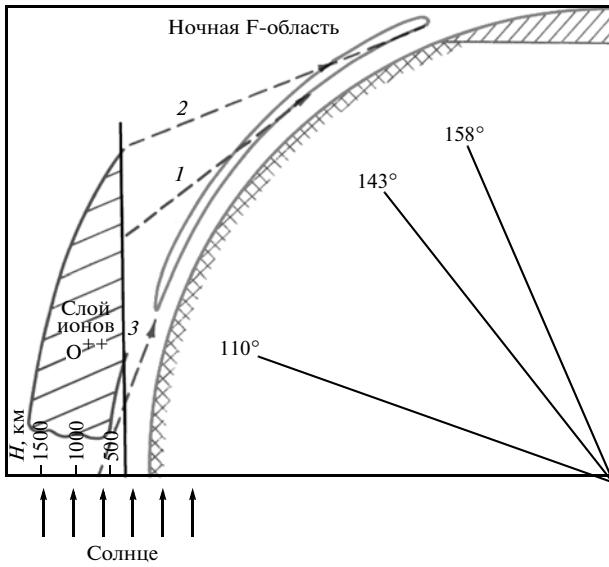
где  $f_{ik}(He^+)$  – сила осциллятора линии  $L_{\alpha} He^+$ , равная 0.416;  $f_{ik}(O^{++})$  – сила осциллятора мультиплетов  $O^{++}$  (табл. 3);  $\Phi_{30.4}$  – поток солнечного излучения в линии 30.4 нм для уровня средней солнечной активности, равный  $5.4 \times 10^9$  квант  $см^{-2}с^{-1}$ ;  $\Phi_{\lambda}$  – поток солнечного излучения в мультиплетах  $O^{++}$  (табл. 3);  $N(O^{++})$  и  $N(He^+)$  – число соответствующих ионов вдоль освещенной УФ-излучением Солнца части линии визирования геокороны. Как и в работе (Carlson et al., 1972), принято, что отношение  $N(O^{++})/N(He^+)$  равно 1.3 внутри плазмосферы, а вне плазмосферы оно составляет 4.0 (Hoffman et al., 1974).

В работе (Carlson et al., 1972), как и в первом рассмотрении возбуждения ионов  $O^{++}$  линией  $L_{\alpha} He^+$  (Bowen, 1935) для условий газовых туманностей, учитывалась возможность переизлучения только в одном переходе  $^3P_2 - ^3P_2^0$ , наиболее близком к центру солнечной линии иона гелия. На самом деле сол-

нечная линия настолько уширена (до 0.02 нм), что еще два перехода  $O^{++}$  с изменением полного момента  $J(2 \rightarrow 1)$  и  $(1 \rightarrow 2)$  могут участвовать в переизлучении  $L_{\alpha} He^+$  на ионах  $O^{++}$  геокороны со средней величиной альбедо ~60 и 11%. Здесь учтена форма солнечной линии  $L_{\alpha} He^+$  по экспериментальным данным (Doshchek et al., 1974; Naghmoosh, Murphy, 1983; Sternberg, Brinton, 1982). Соответствующие статистические веса для этих линий составляют 3/9 и 5/9. Проведенный учет двух переходов увеличивает вклад  $O^{++}$  в переизлучение линии  $L_{\alpha} He^+$  лишь на 17%, что, однако, немаловажно, так как интенсивность солнечной линии 30.4 нм очень велика.

В целом минимальный вклад всех линий  $O^{++}$  в излучение внутривлазмосферной области геокороны достигает 30% от рассеяния линии 30.4 нм непосредственно на ионах  $He^+$ . На широтах, больших ~55° (т.е. вне плазмосферы), роль  $O^{++}$  возрастает втрое в спокойных условиях (табл. 3). Если же рассматривать периоды после геомагнитной бури, когда концентрация  $O^{++}$  может повышаться на порядки величины, то основной вклад в УФ-излучение геокороны дает рассеяние солнечного излучения именно на ионах  $O^{++}$  и прежде всего в линии  $O^{++}$   $\lambda = 30.4$  нм. Это следует из того экспериментального факта, что плотность ионов  $He^+$  в геокороне после геомагнитных бурь изменяется очень незначительно (Geiss et al., 1978; Geiss, Young, 1981).

Рассмотрим схему рассеяния на ночную сторону солнечной УФ-радиации на слое ионов  $O^{++}$ . На рисунке приведена часть ночной стороны земного шара и показаны условия освещения F2-области ионосферы (на высотах  $350 \pm 50$  км) сверху на различных зенитных расстояниях Солнца. Границы слоя ионов  $O^{++}$  выбраны по работе (Авакян, Деминов, 1983), где показано, что после геомагнитной бури слой максимальной плотности этих ионов поднимается и уровни половинной плотности располагаются на высотах 500 и 1680 км. В этом случае слой  $O^{++}$  ионов может освещать большую часть ночной F-области, производя в ней ионизацию и оптическое возбуждение везде, где рассеянное УФ-



Часть ночной стороны земного шара, при этом показаны условия освещения F2-области ионосферы (на высотах  $350 \pm 50$  км) сверху на различных зенитных расстояниях Солнца.

излучение входит под косыми углами  $Z = 70^\circ - 90^\circ$ . При уменьшении  $Z$  все большая часть УФ-излучения геокороны проникает в нижнюю ионосферу, не участвуя в ионизации и возбуждении F-области. Расчеты (Авакян и др., 1984) показали, что с учетом наличия анизотропии поля рассеянного геокоронной на ночную сторону излучения Солнца в линиях гелия, ионов гелия и кислорода (прежде всего двухзарядных) как по азимуту, так и по зенитному углу интенсивность излучения линии He I  $\lambda = 58.4$  нм (включая сюда же линии  $O^{++}$  50.7, 70.3 и 83.4 нм) увеличивается в условиях, близких к наблюдению ночной реакции F-области на солнечные вспышки, до 5 раз, а в линии He II/O III  $\lambda = 30.4$  нм – до 6 раз (табл. 4). Подчеркнем, что этот вывод справедлив для случая освещения этим УФ-излучением ночной F-области сверху. Кроме того, учтен подъем ионосферного слоя  $O^{++}$  после магнитной бури согласно расчетам (Авакян, Деминов, 1983) с изменением

высоты максимума от 700 до 1100 км. Такая модель была использована дважды – для расчетов ночной ионизации F-области и интенсивности излучения ночной F-области в периоды вне и во время солнечных вспышек (Авакян и др., 1983, 1984; Коваленок и др., 1988). Результаты расчетов полностью описывают количественные экспериментальные данные, полученные наземными обсерваториями радиофизическими (по величине плотности тепловых электронов в максимуме F2-слоя) и оптическими (по интенсивности красных линий 630/634 нм в зенитном направлении) методами. Так, приращение ионосферной электронной плотности ночью во время вспышек экспериментально – до 20%, по модельным расчетам – 17% (Авакян и др., 1986), увеличение интенсивности красной эмиссии ночного неба экспериментально зафиксировано от 211 до 252 релей за время вспышки, модельный расчет дает соответственно 210 и 249 релей (Авакян и др., 1983, 1984, 1985). В модели также проявляется временной ход интенсивности эмиссии, связанный с различным временем включения основных механизмов возбуждения: мгновенно – через удар фотоэлектронов, постепенно – за счет диссоциативной рекомбинации молекулярного иона кислорода. Последний, оставаясь основным, сказывается с задержкой во времени примерно на 13 мин, и это проявляется в экспериментальных данных (Авакян и др., 1985).

Для физики солнечно-земных связей важно, что обнаруженные периоды реакции ночной верхней ионосферы на солнечные вспышки сопровождались достаточно уникальным геофизическим явлением – практически полным отсутствием геомагнитных пульсаций различных видов как раз во время наблюдений космонавтов. В (Авдюшин, Данилов, 1993) отмечено, что нарушения ритмов этих пульсаций может оказывать влияние на организм человека, если они по частотам близки к собственным биологическим ритмам человеческого организма. Этот вопрос рассмотрен в (Коваленок и др., 2005) в связи с пилотируемыми полетами к Марсу. Как известно, у Марса нет собственного магнитного поля, кроме того, сам межпланетный перелет будет проходить наибольшую часть време-

**Таблица 4.** Модельное распределение интенсивности УФ-излучения геокороны (в реляях) ночью с высоты более 400 км при различных условиях: 1 – фоновое, 2 – после магнитной бури в момент солнечной вспышки (в периоды наблюдения повышенного свечения ночной F-области)

Условие	$\lambda$ , нм	$Z_{\text{набл.}}$				
		$15^\circ$	$45^\circ$	$67.5^\circ$	$80^\circ$	$90^\circ$
1	58.4	70(5.6)*	70(5.6)	85(6.8)	85(6.8)	85(6.8)
	30.4	20(1.6)	35(2.8)	40(3.2)	40(3.2)	40(3.2)
2	58.4	350(28)	350(28)	430(34)	430(34)	430(34)
	30.4	100(8.0)	190(15)	250(20)	250(20)	250(20)

\* В скобках указана интенсивность свечения геокороны в единицах  $10^6$  квант  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ .

ни вне земной магнитосферы. Следовательно, космонавты окажутся практически в течение всего времени экспедиции вне действия привычного ритма геомагнитных пульсаций. Но, согласно (Коваленок и др., 2005), в периоды отсутствия геомагнитных пульсаций в длительном полете на орбитальной станции фиксировались повышенная нервная возбудимость членов экипажа космонавтов и конфликтность взаимоотношений его членов, выражавшаяся и в конфликтах при радиопереговорах с Центром управления полетами (ЦУП). Тогда очевидно, что этот эффект воздействия одного из физических факторов космического пространства на космонавтов должен обязательно быть принят во внимание при подготовке межпланетных экспедиций и при этом разработаны предупредительные меры для сохранения работоспособности и здоровья экипажа.

Итак, в данной части статьи описаны основные экспериментальные и теоретические результаты по исследованию нового геофизического явления – реакции ночной верхней атмосферы (на высоте F-области ионосферы) на некоторые солнечные вспышки в периоды после изолированных геомагнитных бурь. Этот эффект был сперва обнаружен в наблюдениях космонавтов (Лазарев и др., 1981, 1983, 1987; Авакян и др., 1984), затем подтвержден фотометрическими патрульными измерениями Абастуманской астрофизической обсерватории (Авакян и др., 1985), обнаружен также в ионограммах сети ионосферных станций вертикального радиозондирования (Авакян и др., 1983, 1984, 1985) и получил полное количественное физическое объяснение в рамках специально разработанной гелиогеофизической теоретической модели явления (Авакян и др., 1986, 1984; Коваленок и др., 1988).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, с борта отечественных пилотируемых космических кораблей, орбитальных научных станций и комплексов был впервые зарегистрирован следующий ряд новых оптико-геофизических явлений: явления волновой природы – горизонтальная неоднородность эмиссионного излучения верхней ионосферы и локальные быстропротекающие эффекты в свечении полярных сияний; явление реакции оптических и ионосферных параметров ночной F-области земной ионосферы на солнечные вспышки. Такое явление спорадического возрастания интенсивности эмиссионного излучения верхней атмосферы Земли прямо связано с периодами солнечных вспышек.

В рамках предложенной для объяснения явлений физической гипотезы удалось получить количественные результаты, подтверждающиеся экспериментальными данными приборных измерений ионосферных станций и астрофизической обсерватории. Результаты всей совокупности представлен-

ных исследований – визуально-инструментальные наблюдения космонавтов, специальная обработка патрульных оптических и радиофизических данных наземных обсерваторий, анализ показаний оптико-электронного и масс-спектрометрического мониторинга в спутниковых измерениях и теоретические расчеты в рамках специально разработанных гелиогеофизических моделей – наглядно показывают исключительные возможности пилотируемых космических полетов для обнаружения новых явлений в физике верхней атмосферы и ионосферы Земли.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян С.В.* Образование двухзарядных ионов атомарного кислорода в верхней атмосфере // Космич. исслед. 1979. Т. 17. № 6. С. 942–945.
- Авакян С.В.* Достижения отечественной космонавтики в исследовании пространственных неоднородностей в эмиссионном излучении верхней атмосферы Земли // Оптич. журн. 1997. Т. 64. № 4. С. 34.
- Авакян С.В.* Микроволновое излучение ионосферы как фактор воздействия солнечных вспышек и геомагнитных бурь на биосистемы // Оптич. журн. 2005. Т. 72. № 8. С. 41–48.
- Авакян С.В.* Физика солнечно-земных связей: результаты, проблемы и новые подходы // Геомагнетизм и аэронавтомия. 2008. Т. 48. № 4. С. 1–8.
- Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф.* Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве. Л.: Гидрометеоздат, 1994. 501 с.
- Авакян С.В., Деминов М.Г.* Диффузия двухзарядных ионов атомарного кислорода в плазмосферу в восстановительную фазу ионосферной бури // Космич. исслед. 1983. Т. 21. № 5. С. 806–810.
- Авакян С.В., Дробжжев В.И., Краснов В.М. и др.* Волны и излучение верхней атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1981. 150 с.
- 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.
- Авакян С.В., Климук П.И., Кокишаров И.И. и др.* Горизонтальная оптическая неоднородность верхней атмосферы на средних и экваториальных широтах по наблюдениям с борта орбитальной научной станции “Салют-4” // Оптические исследования излучения атмосферы, полярных сияний и серебристых облаков с борта ОС “Салют-4”. Тарту: АН ЭССР, 1977. С. 88.
- Авакян С.В., Коваленок В.В., Лазарев А.И., Серова А.Е.* Наблюдения горизонтальной неоднородности ночного свечения F слоя в районе Бразильской аномалии // Геомагнетизм и аэронавтомия. 1982. Т. 22. № 6. С. 1018.
- Авакян С.В., Коваленок В.В., Солоницына Н.Ф.* Ночная F-область ионосферы в периоды вспышек на Солнце. Алма-Ата: Наука, 1984. 150 с.
- Авакян С.В., Коваленок В.В., Солоницына Н.Ф., Рудина М.П.* Оптические и ионосферные эффекты в ночной F2-области ионосферы во время солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэронавтомия. 1983. Т. 23. № 6. С. 919–923.



- Авакян С.В., Кудряшев Г.С., Островский Г.И. О механизме влияния солнечной вспышки на параметры ночной F2-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. № 5. С. 836–837.
- Авакян С.В., Кудряшев Г.С., Фишкова Л.М. Об усилении эмиссии 01 630 нм свечения ночного неба во время солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. № 3. С. 415–419.
- Авдюшин С.И., Данилов А.Д. Рассказ о космической погоде. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 160 с.
- Береговой Г.Т., Бузников А.А., Кондратьев К.Я. и др. Оптические явления в атмосфере по наблюдениям с пилотируемых космических кораблей. Л.: Гидрометеиздат, 1972а. 47 с.
- Береговой Г.Т., Бузников А.А., Кондратьев К.Я. и др. Вертикально-лучевая структура (горизонтальная неоднородность) излучения верхней атмосферы Земли по наблюдениям с космического корабля “Салют-3” // ДАН СССР. 1972б. Т. 206. № 3. С. 601.
- Гречко Г.М., Романенко Ю.В., Савченко С.А. Внеатмосферные визуальные наблюдения ночного свечения ионосферы Земли // Атмосферно-оптические явления по наблюдениям с орбитальной научной станции “Салют”. Тарту: АН ЭССР, 1981. 147 с.
- Коваленок В.В., Авакян С.В., Боровкова О.К., Воронин Н.А. Космический солнечный патруль и некоторые проблемы пилотируемого полета к Марсу // Оптик. журн. 2005. Т. 72. № 8. С. 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” // Исследования атмосферы и земной поверхности из космоса. Тарту: АН ЭССР, 1988. С. 10–21.
- Лазарев А.И., Авакян С.В. Вертикально-лучевая структура эмиссионного излучения верхней атмосферы и акустико-гравитационные волны // Тез. докл. 1-го Всес. симп. Оптические исследования верхней атмосферы. Тбилиси. Мецнибера, 1975. С. 52.
- Лазарев А.И., Коваленок В.В., Авакян С.В. Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 400 с.
- Лазарев А.И., Коваленок В.В., Иванченков А.С., Авакян С.В. Атмосфера Земли с “Салюта-6”. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 207 с.
- Лазарев А.И., Коваленок В.В., Савиных В.П. Визуально-инструментальные наблюдения с “Салюта-6”. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 136 с.
- Лазарев А.И., Николаев А.Г., Хрунов Е.В. Оптические исследования в космосе. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 256 с.
- Armstrong E.B. The influence of a gravity wave on the airglow hydroxyl rotational temperature at night // J. Atm. Terr. Phys. 1975. V. 17. № 12. P. 1585.
- Bowen I.S. The spectrum and composition of the gaseous nebulae // Astrophys. J. 1935. V. 81. № 1. P. 1–16.
- Carlson R.W. Possibility of O III 304 Å emissions in the extreme ultraviolet airglow // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. № 31. P. 6282–6283.
- Doschek G.A., Behrig W.E., Feldman U. The widths of the solar He I and He II lines at 584, 537 and 304 Å // Astrophys. J. 1974. V. 190. № 3. P. L141–142.
- Dyson P.L., Hoppod P.A. The interpretation of 6300 Å airglow observations of ionospheric irregularities // Planet. Space Sci. 1974. V. 22. № 3. P. 495.
- Dyson P.L., Newton G.P., Brance L.N. In situ measurements of neutral and electron density wave structure from the Explorer 32 satellite // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 16. P. 3200.
- Farrugia J., Young D.T., Geiss J., Balsiger H. The composition, temperature, and density of structure of cold ions in the quiet terrestrial plasmasphere: GEOS-1 results // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № A9. P. 11865–11891.
- Geiss J., Balsiger P., Eberhardt P., Walker H.P. et al. Dynamics of magnetosphere ion composition as observed by the GEOS mass spectrometer // Space Sci. Rev. 1978. V. 22. № 5. P. 537–566.
- Geiss J., Young D.T. Production and transport of O<sup>++</sup> ions in the ionosphere and plasmosphere // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. № 6. P. 4739.
- Hoffman J. H. et al. Initial ion composition results from the ISIS-2 satellite. // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 28. P. 4246–4251.
- Horwitz J.L., Comfort R.H., Chappell C.R. Plasmasphere–ionosphere coupling. 2. Ion composition measurements at plasmaspheric and ionospheric altitudes and comparison with modeling results // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. № A6. P. 7949–7959.
- Meier R.R., Weller C.S. EUV resonance radiation from helium atoms and ions in the geocorona // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. № 7. P. 1190–1204.
- Mullaney H., Paragiannis M.D., Noxon J.F. Parallel study of 6300 Å airglow emission and ionospheric scintillation // Planet. Space Sci. 1972. V. 20. № 1. P. 41.
- Naghmoosh A.A., Murphy J.A. A comparative study of H<sup>+</sup> and He<sup>+</sup> at sunspot minimum and sunspot maximum // J. Atm. Terr. Phys. 1983. V. 45. № 10. P. 673.
- Newton G.P., Pelz D.T., Volland H. Characteristics of wave structure in the neutral thermosphere // Space Res. V. 8. 1968. P. 980.
- Newton G.P., Pelz D.T., Volland H. Direct in situ measurements of wave propagation in the neutralthermosphere // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. № 1. P. 183.
- Ogama T., Tohmatsu T. Sounding rocket observations of helium 304 and 584 Å glow // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. № 25. P. 6136–6145.
- Paresce F., Bowyer S., Kumar S. Evidence for an interstellar or interplanetary source of diffuse He I 584 Å radiation // Astrophys. J. 1973. V. 183. № 2. P. L87–L90.
- Paresce F., Bowyer S., Kumar S. On the distribution of He<sup>+</sup> in the plasmosphere from observations of resonantly scattered He II 304 Å radiation // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 1. P. 174–178.
- Roberts W.T. Jr., Horwitz J.L., Comfort R.H., Chappell C.R. et al. Heavy ion density enhancements in the outer plasmasphere // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. № A12. P. 13499–13512.
- Sternberg A., Brinton H.C. Short-term EUV flux variations from AE – E He II abundances // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. № 1. P. 246–248.
- Victor G.A., Constantinides E.R. Double photoionization and double charged ions in the thermosphere // Geophys. Res. Lett. 1979. V. 6. № 6. P. 519.

## **Manned Space Flight – to Investigations of Earth from Space (Upper Atmospheric and Ionospheric Phenomena)**

**S. V. Avakyan<sup>1</sup>, A. S. Ivantchenkov<sup>2</sup>, V. V. Kovalenok<sup>2</sup>, V. P. Savinykh<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *All-Russian Scientific Center S.I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg*

<sup>2</sup> *Rocket-Space Corporation “Energia”, Korolev, Moscow Region*

<sup>3</sup> *Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow*

Summarizes the results of visual and instrumental investigations from board domestic manned spacecraft Soyuz, the orbital scientific station Salyut-6, and orbital complex the Mir of new optical phenomena in the Earth's upper atmosphere. These are: the phenomena of nature wave – the horizontal heterogeneity of the emission radiation of the upper ionosphere and the local fast effects in the glow of auroras, the phenomenon of the reaction of the optical and ionospheric parameters of the terrestrial nocturnal F region ionosphere to the solar flares. Models of the physical interpretation of observed phenomena based at the heliogeophysical disturbances in space weather.

**Keywords:** manned spacecrafts, orbital scientific stations, Earth's upper atmosphere, F-region of ionosphere, glow of auroras, solar flares