

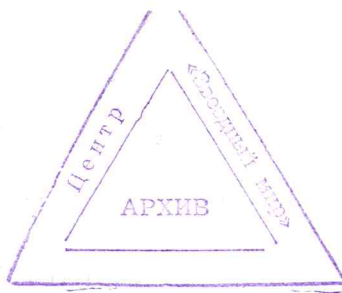
Советский фонд мира
Центр „Звездный мир“

ОТС и электро-
магнитные явления
в атмосфере

Руководитель темы
РАДШУН Р.В.

Минск-Гомель

1989



УТВЕРЖАЮ

А.С. ЮНИЦКИЙ
А.С. ЮНИЦКИЙ

Директор центра

"Звездный мир",

Научный руководитель

Программы "Звездный мир"

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТС С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ
В АТМОСФЕРЕ

Руководитель ВТК

Р.В. Радшун
Р.В. Радшун

УДК 533.9
+УДК 551.594

Радшун Р.В. Анализ взаимодействия ОТС с электромагнитными явлениями в атмосфере.

Рассматривается предполагаемое взаимодействие ОТС с электромагнитными явлениями в верхней атмосфере и тропосфере. Ставятся задачи оценки влияния на магнитосферные процессы, обеспечения безопасности во время гроз и оценки целесообразности использования их энергии. Производятся общие количественные оценки и определяются концепции решения поставленных задач.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОБЗОР ЯВЛЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.
ПРЕДПОЛАГАЕМОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ОТС.

Экологическая безопасность лежит в самой основе концепции ОТС и подразумевается с самого начала. Она очевидна, когда дело касается вредных выбросов, шума, высоких температур, связывания атмосферного кислорода.

Но существуют факторы не столь заметные и, вероятно, в меньшей степени нарушающие экологическое равновесие, однако, достаточно значимые и не слишком очевидные, а, следовательно, требующие, по меньшей мере, предварительной оценки. Это взаимное влияние ОТС и электромагнитных явлений в атмосфере.

Нижний слой ионосферы, который начинается с высоты 50 км от земной поверхности, выделяется в самостоятельную оболочку - электросферу. Как всякий носитель свободных зарядов в магнитном поле, она служит экраном, который изолирует электрические процессы в приземных слоях атмосферы от непосредственного влияния ионосферно - магнитосферных явлений. При таком подходе считается, что ионосферные процессы влияют на атмосферное электричество /электрические явления в тропосфере - приземном слое атмосферы, который содержит в себе 4/5 массы всей атмосферы и в котором развиваются метеорологические явления/ только через погоду./3/.

Значит, магнитосферно-ионосферные взаимодействия и явления атмосферного электричества следует рассматривать отдельно.

В каждом случае необходимо свести к минимуму вредные последствия вмешательства одновременно с достижением наиболее полезных и безопасных результатов.

ОТС в околоземном космосе.

Замечание о свойствах ОТС как проводника и ферромагнетика
глобальной протяженности

Глобальная протяженность ОТС, проводящие и ферромагнитные свойства его материалов могут вызвать мысль о неблагоприятном воздействии на явления, связанные с земным магнетизмом. Следует рассмотреть, какие электромагнитные явления могут оказаться неблагоприятными, и может ли на их развитии сказаться присутствие ОТС в около-

земном космосе.

Магнитное поле защищает поверхность Земли и все живое на ней от прямого доступа солнечного корпускулярного излучения.

Типичные значения околоземного магнитного поля естественного происхождения порядка 10^{-4} Тл = 1 Гс. В лабораторных условиях их влиянием на движение заряженных элементарных частиц обычно пренебрегают. Но в условиях околоземного космоса влияние геомагнитного поля становится существенным. На расстояниях порядка радиуса Земли и больших радиус кривизны траектории частицы, определяемый магнитным полем, нельзя принимать за бесконечность. Отклонения движения от прямолинейного очень заметны. Так, заряженные частицы солнечного ветра, попадающие в околоземное пространство, в большинстве своем не достигают поверхности планеты, а задерживаются, совершая сложные колебательные движения в геомагнитной ловушке и образуя, т.о., радиационные пояса.

Так существенное увеличение расстояний может качественно изменить значимость явлений.

Подобно тому, как слабое магнитное поле при большой протяженности оказывает существенное влияние на жизнь Земли, не исключается возможность того, что проводники глобальной протяженности, например, элементы конструкции ОТС, вызовут явления, существенно новые по сравнению с теми, которые вызывает в природе присутствие обычных проводников. Следует рассмотреть, не может ли существенно усиливаться взаимное влияние относительно независимых областей околоземного пространства или атмосферы в случае достаточно высокой проводимости элементов ОТС.

Кроме того, если ток, который может быть вызван в таких проводниках потенциалами естественного происхождения, окажется значительным, следует учесть, что он явится источником магнитного поля.

Пути воздействия возмущений геомагнитного поля на биосферу.

Явления биологической природы, связанные со вспышками на Солнце и магнитными бурями, скорее всего не следуют непосредственно из магнитосферных возмущений.

Магнитные поля, применяемые в медицине, измеряются десятками мТл, а напряженность геомагнитного поля вблизи Земли - около 10^{-4} Тл; т.е., на 2 порядка слабее. Отклонения во время магнитных бурь

не превышают 10^{-6} - 10^{-5} Тл, т.е., разница достигает уже 3 - 4 порядков.

А влияние на биологические явления погодных изменений, прежде всего, перепадов давления, в том числе, связанных с магнитными бурями, не вызывает сомнения.

Но чтобы учесть и возможность непосредственного влияния колебаний магнитного поля, при вычислении составляющей магнитного поля, вносимой ОТС, ее величину следует сравнить с аналогичным результатом влияния солнечной активности.

Когда Солнце спокойно, защитный механизм магнитосферы действует стационарно. Заряженные частицы солнечного ветра попадают в плотные слои атмосферы только в высоких широтах, вблизи геомагнитных полюсов, и это вызывает, в частности, полярные сияния./4,5/.

Но в периоды повышенной солнечной активности, которая вызывает вариации геомагнитного поля на порядок - два меньше его среднего значения со сложным комплексом следствий - магнитосферные суббури, а также последовательности причинно-связанных магнитосферных суббурь - мировые магнитные бури, характер движения частиц радиационных поясов может меняться. Тогда существенно большая, чем обычно, доля частиц солнечного ветра достигает плотных слоев атмосферы.

При этом высыпание частиц радиационных поясов может происходить в средних и низких широтах. Такие процессы существенно влияют на погоду, а через погоду - на биосферу./6,7/.

Но при влиянии высыпания частиц на погоду и биосферные процессы нет такой явной причинно-следственной зависимости, какая наблюдается при влиянии солнечной активности на процессы в магнитосфере и ионосфере /сильно разреженная область атмосферы с высокой концентрацией ионов и электронов, расположенная выше 70 км над поверхностью Земли/.

Энергообмен между поверхностью Земли и атмосферой, и, следовательно, погода и климат, зависит, главным образом, от постоянной составляющей солнечной радиации. А суммарная энергия частиц, которые высыпаются в атмосферу, хотя и может, вследствие длительности высыпания, превышать в 5 - 10 раз энергию, вносимую солнечным рентгеновским излучением, недостаточна для того, чтобы оказать на прямую существенное влияние на процессы, формирующие погоду./6/

Зависимость между солнечной активностью и погодой, связующим звеном в которой являются высыпания заряженных частиц из магнитосферы в среднюю атмосферу /ниже 80 км/ - статистическая./7, с.37/ Так, известно, что они повышают вероятность зарождения тропических

циклонов - тайфунов.

О том, как именно количество сбрасываемых из радиационных поясов частиц влияет на погоду, существуют разные предположения. Например, есть гипотеза о том, что ведущая роль принадлежит влиянию дополнительного тепла или ультрафиолетового излучения, вызываемого взаимодействием заряженных частиц с молекулами воздуха. В другом случае - некоторому изменению химического состава атмосферы под влиянием ионизации/6/, или влиянию повышенной концентрации водяного пара, вызываемой в воздухе подобно тому, как это происходит в камере Вильсона./7, с.12,24/. Не исключено и то, что эти факторы действуют одновременно.

Во всяком случае, связь существует, поэтому задача состоит в том, чтобы рассмотреть механизм захвата и высыпания частиц и оценить степень возможности влияния на них присутствия ОТС.

Результаты этих оценок должны показать, есть ли необходимость ставить определенные требования к свойствам материалов ОТС с целью минимального нарушения устойчивости радиационных поясов, придется ли выбирать благоприятное время для запуска ОТС или понадобится принять какие-то технические меры.

ОТС и электричество облаков.

Рассмотрим теперь, какие задачи возникают, когда ОТС находится в тропосфере.

По всей видимости, из-за грозовой активности в этом случае необходимость обеспечить безопасность функционирования ОТС будет более насущной и определенной, чем задача экологической безопасности.

Из предполагаемых вариантов географического расположения ОТС экваториальное является наиболее простым, кроме прочего, и с точки зрения анализа явлений атмосферного электричества.

Особенности экваториального климата определяются высокими температурами, не изменяющимися существенно в течение года, низким атмосферным давлением, слабыми ветрами переменного направления, преобладанием океанов над сушей. Днем там обычно выпадают ливни, нередко с грозой. Именно эта грозовая активность, которую в первом приближении можно считать регулярной и ежедневной, а при необходимости сделать поправки на реально наблюдаемые отклонения от регулярности, нас интересует.

В умеренных поясах обоих полушарий хотя облачных дней в году больше, чем на экваторе и в тропиках, грозových дней в году гораздо меньше, особенно зимой. Известно, что зимняя гроза - аномалия.

В полярных районах грозы не наблюдаются ни в какое время года/8/.

При выборе широты расположения ОТС вместе с другими должны быть учтены результаты общего анализа взаимодействия ОТС с электричеством нижней атмосферы с точки зрения безопасности, использования энергии и экологических соображений.

Фазы развития упомянутых выше экваториальных гроз в первом приближении для каждого пункта зависят от местного времени. Т.о., вся эстакада, охватывающая Землю по экватору, за сутки каждым из своих участков проходит по очереди развернутые вдоль экваториальной зоны фазы грозовой активности.

Тогда практически все время по проводящим заземленным частям эстакады где-нибудь могут происходить удары молний. Очевидно, следует принять меры к тому, чтобы обеспечить в таких условиях безопасность работ на эстакаде и маневров ОТС.

Т.к. эстакада - стационарное наземное сооружение, меры ее защиты от поражений разрядами молний традиционны.

Грозы как источник энергии.

Но, кроме того, т.к. разряды молний на эстакаду происходят постоянно, грозы можно рассматривать как специфичный для устройства глобальной протяженности источник энергии. Следовательно, имеет смысл проанализировать целесообразность совместить защиту от молний с использованием их энергии, т.е., отведенный от нежелательного объекта разряд каким-либо образом преобразовать и аккумулировать.

Тут необходимо будет учесть существенность вклада в энергетику ОТС, сравнить с той энергией, которую могут дать ионосферные токи и, если возникнут, учесть ограничения, накладываемые соображениями экологического равновесия.

Сравнение энергии молний и ионосферы представляет интерес еще и потому, что они связаны между собой, и зависимость их неоднозначна.

Известно, что Земля имеет отрицательный заряд 10^5 Кл, который остается постоянным в результате динамического равновесия токов между ионосферой /электросферой/ и поверхностью планеты.

В областях хорошей погоды ток направлен вниз, и при незначитель-

расположение протяженной проводящей конструкции

в ионосфере, в том числе и экваториальной электросфере

в тропосфере

заземленное

Табл. 1

с о с т о я н и е м а г н и т о с ф е р ы							
с п о к о й н о е	в о з б у ж д е н н о е						
<p>движение ОТС ферромагнетика или сверхпроводника</p> <p>разэкранирование намагниченных элементов</p>	<p>вариации магнитного поля в присутствии ферромагнетика или сверхпроводника</p>						
Э л е к т р о с ф е р а в ы с о т а 50 к м п о т е н ц и а л о т н о с и т е л ь н о З е м л и 400000 В							
ф а з ы р а з в и т и я г р о з ы							
х о р о ш а я п о г о д а	н а р у ш е н н а я п о г о д а						
	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">р а з д е л е н и е з а р я д о в</td> <td style="text-align: center;">р а з р я д ы м о л н и й</td> </tr> <tr> <td> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">д о ж д е в н ы е о б л а к а</td> <td style="text-align: center;">г р о з о в ы е т у ч и</td> </tr> </table> </td> <td> <p>разряды между тучами или внутри туч в грозовой области, соответствующей времени подъема</p> </td> </tr> </table>	р а з д е л е н и е з а р я д о в	р а з р я д ы м о л н и й	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">д о ж д е в н ы е о б л а к а</td> <td style="text-align: center;">г р о з о в ы е т у ч и</td> </tr> </table>	д о ж д е в н ы е о б л а к а	г р о з о в ы е т у ч и	<p>разряды между тучами или внутри туч в грозовой области, соответствующей времени подъема</p>
р а з д е л е н и е з а р я д о в	р а з р я д ы м о л н и й						
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">д о ж д е в н ы е о б л а к а</td> <td style="text-align: center;">г р о з о в ы е т у ч и</td> </tr> </table>	д о ж д е в н ы е о б л а к а	г р о з о в ы е т у ч и	<p>разряды между тучами или внутри туч в грозовой области, соответствующей времени подъема</p>				
д о ж д е в н ы е о б л а к а	г р о з о в ы е т у ч и						
в о з м о ж н о е в з а и м н о е в л и я н и е п о т е н ц и а л о в о б л а к о в ч е р е з к о н т а к т с О Т С							
т о к и З е м л я - и о н о с ф е р а							
<p>приповерхностный потенциал увеличивается при напряженности более 500 В/м</p> <p>токи с острий</p>							
з а з е м л е н н ы е п р е д м е т ы п р и о б р е т а ю т п о т е н ц и а л З е м л и							
	<p>разряды молний на высокие или уединенные заземленные предметы</p>						

ной плотности тока суммарное значение силы тока по всей Земле достигает 1800 А. При этом конденсатор Земля - ионосфера разряжается. А в областях нарушенной погоды / прежде всего это области грозовой активности / в обратном направлении протекают токи зарядки. Молнии и осадки переносят положительный заряд от земли в нижнюю часть тучи, что в конечном счете приводит к переносу заряда от земной поверхности к нижней границе ионосферы. Напряженность электрического поля по мере назревания грозы возрастает, направление поля при этом противоположно тому, которое наблюдается в областях хорошей погоды. Картина распределения зарядов и потенциалов, соответственно, также обратная./5/.

Кроме молний и осадков существуют другие механизмы токов зарядки. Это токи с острий /различных заземленных предметов от мачт до травы/, которые возникают перед грозой, когда приповерхностный градиент разности потенциалов достигает 500 В/м, а также пылевые бури и извержения вулканов./5/.

Так, некоторая часть потенциала ионосферы относительно земной поверхности создается некоторой долей глобального грозового механизма, а именно, только теми молниями, которые разряжаются в землю. Поэтому, рассматривая явления атмосферного электричества, сравним, что представляет собой более удобный источник энергии для ОТС, мощность какого процесса больше.

ОТС во время подъема.

В зависимости от состояния погоды и расположения протяженного проводника ситуация существенно меняется, и необходимо каждый раз ставить свою задачу. Для удобства обзора совокупность основных вариантов таких ситуаций сведена в таблицу 1.

По вертикали снизу вверх отмечается уровень расположения эстакады или ОТС: на земной поверхности; в тропосфере. Для общности картины в таблице также отмечены рассмотренный выше случай присутствия ОТС в ионосфере и области экваториального струйного электротока.

По горизонтали слева направо - фазы развития грозы: хорошая погода; созревание дождевых облаков; грозовые тучи; наконец, разряды молний.

Предполагаемые связи, степень значимости которых покажет коли-

чественное рассмотрение, определяют задачи, объединяющие по несколькоу клеток таблицы, и решать их необходимо в единстве взаимодействия.

Из всех возможных случаев нас интересуют такие, которые могут либо нарушить экологическое равновесие, либо создать источник энергии, либо внесут новые условия, которые необходимо учесть для безопасности функционирования ОТС.

Рассматривая электромагнитные явления при прохождении ОТС сквозь грозовую облачность, возьмем за основу простейший случай, когда ОТС проходит сквозь единственное облако.

Разряды молний происходят в грозовых облаках, которые формируются в результате развития кучево-дождевых облаков. Они расположены на высоте 1 - 2 км над землей, высота самих кучево-дождевых облаков достигает 10 - 15 км, горизонтальная протяженность - порядка 10 км.

Разобрав идеализированный случай грозовой деятельности в одном облаке, мы поймем, требует ли рассмотрение прохождения ОТС через несколько облаков каких-то изменений подхода или общая картина остается прежней, а увеличивается только протяженность контакта.

Теперь рассмотрим, что изменится, когда ОТС начинает подъем в тропосфере.

Прежде всего, заземленное расположение эстакады стационарно, а конкретные условия взаимодействия ОТС на подъеме с областью грозовой активности меняются по мере подъема.

Продолжительность взаимодействия определяется временем подъема. При вертикальной скорости 20 м/с если момент количества движения будет равномерно передаваться от ротора к корпусу, так, что скорость корпуса на высоте 300 км достигнет 1-й космической, за первые 12 - 13 минут подъема, которые понадобятся ОТС, чтобы пройти облачный слой, корпус повернется не более, чем на 2 градуса. Так что область взаимодействия остается сравнительно локальной. В этом случае вряд ли целесообразно совмещать защиту от молний с использованием их энергии. А сами меры этой защиты и другие меры электробезопасности должны отличаться от привычных на Земле.

Известно, что в обычных условиях молния с наибольшей вероятностью ударяет в высокие или уединенные заземленные предметы. Это связано с тем, что, образуя с земной поверхностью эквипотенциальную поверхность, такой предмет одновременно расположен несколько

ближе к нижней части тучи, причем расстояние сокращается как раз у земли, где его значение существеннее из-за того, что градиент потенциала принимает наибольшие значения. В результате возросшая напряженность электрического поля повышает вероятность того, что разрядный канал будет проложен именно здесь.

Но на высоте облачности, во-первых, отсутствует потенциал заземления, во-вторых, основную опасность представляют собой разряды внутри туч и между тучами.

Что в таких условиях наиболее целесообразно: размещать пассажирские отсеки над областями хорошей погоды, гасить каким-то образом или отводить разряды.

Т.к. во время подъема ОТС не заземлено, необходимо рассмотреть возможное сходство и отличие замыкания на проводящую оболочку ОТС и заземления как с точки зрения опасности поражения молниями, так и с точки зрения использования в целях электробезопасности: экранирования приборов и снятия статического электричества.

При подъеме ОТС возможно непроизвольное вмешательство в ход развития грозы, когда его оболочка, которая может представлять собой единый проводник, соединит по-разному заряженные части облаков.

Возможно, что требования безопасности потребуют произвольного влияния на грозу. Тогда необходимо определить, не встречается ли необходимая степень вмешательства в естественную грозовую деятельность каких-то возражений с точки зрения требований экологии.

Таким образом, мы определили основные задачи о взаимодействии ОТС и атмосферного электричества. Здесь не может быть притязаний на абсолютную полноту, но основные ситуации учтены, а некоторые задачи еще закономерно появятся по ходу решения.

Во 2-м разделе будет изложено решение поставленной выше задачи о значимости влияния присутствия ОТС в ионосфере на процессы в радиационных поясах, которые могли бы повлиять на биосферу.

В 3-м разделе будет подробно изложен подход к решению только что рассмотренных задач.

Когда ОТС до подъема и эстакада в контакте с земной поверхностью, необходимо проанализировать целесообразность совмещения защиты от молний с использованием их энергии, сравнить с энергией

ионосферы. Кроме того, следует оценить существенность, и, если необходимо, допустимую степень вмешательства в общее равновесие атмосферных токов при использовании энергии молний.

Для случая движения ОТС в тропосфере основное - меры безопасности при прохождении грозовой облачности. И следует оценить существенность и допустимую степень вмешательства в общее равновесие атмосферных токов в результате произвольного и непроизвольного влияния на ход развития грозы.

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТС С ВОЗБУЖДЕННОЙ МАГНИТОСФЕРОЙ

Искажение геомагнитного поля.

Оценим возмущения, которые возникают в магнитном поле Земли на 100-километровом расстоянии от ОТС как около внесенного в поле ферромагнетика или сверхпроводника.

Индукция геомагнитного поля вблизи земной поверхности составляет 10^{-4} Тл. В ионосфере, где происходит сбрасывание вакуумированной оболочки и выход на геостационарную орбиту, значение магнитной индукции, во всяком случае, не больше. Тогда, взяв магнитную проницаемость ферромагнетика 5000, получаем, что поле внутри ферромагнетика 0,5 Тл.

Мощность линейного электродвигателя составляет 1 кВт на погонный метр. Оценка остаточного намагничения ротора проведена из тех соображений, что магнитное поле должно действовать на него с силой, равной мощности двигателя, деленной на скорость разгона. Получается значение поля внутри вещества ротора, равное 0,8 Тл.

Значит, составляющая, вносимая присутствием бесконечно длинного цилиндра сечением 0,1 м из ферромагнитного вещества в магнитное поле Земли на расстоянии 100 км от поверхности цилиндра - порядка 10^{-15} Тл, намагничением после разгона - 10^{-14} Тл.

Отсюда видно, что искажение, вносимое ОТС в магнитное поле непосредственно как предметом из ферромагнитного материала, т.е., втягивание силовых линий и, соответственно, некоторое ослабление поля снаружи, очевидно не снизит защитную функцию магнитосферы, т.к. она имеет огромную протяженность - до 10 земных радиусов от поверхности планеты. Радиус Земли - около 6378 км.

Возмущения, типичные для магнитосферных суббурь достигают величин порядка 10^{-6} Тл, для наиболее мощных магнитных бурь - порядка 10^{-5} Тл. Т.о., искажения, вносимые присутствием ОТС и остаточным намагничением ротора на 8 - 9 порядков меньше возмущений, наблюдаемых при обычных магнитосферных суббурях, и ими вообще можно пренебречь.

В случае ротора со сверхпроводящим покрытием возмущение будет, пропорционально магнитной проницаемости, на 3 порядка меньше и с обратным знаком.

Для случая стационарного ОТС, когда ротор постоянно находится в вакуумном канале, и магнитные поля подвеса заэкранированы корпу-

сом для внешнего пространства, ситуация практически не отличается от только что рассмотренной.

Общая структура магнитосферы.

Для наглядности дальнейшего изложения опишем общую структуру магнитосферы. /9,13,17/.

Вблизи Земли магнитное поле имеет дипольный характер. Конфигурация силовой линии описывается уравнением

$$r = r_0 \sin^2 \theta,$$

где r – радиус-вектор данной точки, r_0 – расстояние, на которое линия отстает от центра Земли в экваториальной плоскости, а θ – дополнение до 90° геомагнитной широты данной точки.

Таким образом, расстояние, на которое геомагнитная силовая линия отстает от центра Земли /часто удобнее считать от земной поверхности/ однозначно связано с широтой, на которой линия упирается в землю.

С высотой симметрия магнитного поля Земли искажается под давлением солнечного ветра. Его дипольный характер сохраняется только во внутренней магнитосфере.

Внешняя часть магнитосферы существенно асимметрична. С дневной стороны граница магнитосферы – магнитопауза – отстоит от поверхности Земли в экваториальной плоскости приблизительно на 10 земных радиусов. С ночной стороны геомагнитные линии разомкнуты и магнитосфера простирается в сторону, противоположную Солнцу, на расстояние до 1000 земных радиусов.

Структурные образования внутри магнитосферы определяются свойствами плазмы.

Плазмосфера снизу на высоте 1000 км переходит в верхнюю ионосферу Земли, а сверху ограничена плазмопаузой, которая располагается на расстояниях $3 \div 8$ земных радиусов от поверхности. Концентрация плазмы падает на плазмопаузе в 100 – 1000 раз.

Кольцевой ток расположен в плоскости геомагнитного экватора на расстояниях от 4 до 7 земных радиусов. Концентрация частиц в нем в 1000 раз меньше, чем в плазмосфере.

В высоких широтах Северного и Южного полушарий силовыми линиями магнитного поля образуются дневные полярные каспы – воронки, заполненные плазмой солнечного ветра, которая вторгается туда из пере-

ходного слоя на границе магнитопаузы.

Через ночные полярные каспы проникает плазма из нейтрального слоя, который расположен вблизи экваториальной плоскости в хвосте магнитосферы /с ночной стороны/.

Форма радиационных поясов определяется силовыми линиями.

Внутренние радиационные пояса расположены на расстояниях от 1,5 до 2 земных радиусов и подходят к ионосфере на высоте 200 - 300 км на широте около 45° .

Внешние радиационные пояса в плоскости геомагнитного экватора отстоят от поверхности Земли на $4 \div 6$ земных радиуса. Пояс протонов слабых энергий расположен на расстояниях $1,5 \div 7-8$ земных радиусов. Они приближаются к Земле до расстояний 200 - 300 км на $50^\circ-60^\circ$ широты.

Движение частиц в магнитной ловушке.

Радиационные пояса образуются при движении заряженных частиц в геомагнитной ловушке. /5,9,11,12,17/. Рассмотрим основные закономерности этого движения.

Сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу, не совершает работы, а поворачивает вектор скорости в плоскости, перпендикулярной силовой линии, т.к. ее направление определяется векторным произведением вектора магнитной индукции и скорости. Но т.к. у частицы есть кроме того составляющая скорости, параллельная силовой линии, то, кроме вращения, частица совершает продольное поступательное движение.

А искривленность линий геомагнитного поля и их сгущение к полюсам приводят по мере движения частицы к такому изменению соотношения между вращательной и поступательной составляющими, что в определенной точке направление поступательного движения меняется на обратное. При этом направление вращения сохраняется.

Кроме циклотронного движения /вращения вокруг силовой линии/ и колебания между точками отражения частицы совершают дрейф вокруг Земли.

Радиационные пояса представляют собой в определенном смысле саморегулирующуюся систему. В периоды активного Солнца усиление корпускулярного излучения приводит к инжекции существенно большего, чем обычно, числа частиц в область радиационных поясов со стороны хвоста магнитосферы.

Кроме увеличения числа частиц в радиационных поясах, в них про-

исходит изменение распределения по питч-углам /углам между направлением скорости и касательной к силовой линии/. Но как следствие развивающихся в результате этого процессов происходит возбуждение колебаний, взаимодействующих с частицами так, что функция распределения восстанавливается, а также происходит уменьшение времени жизни частиц в радиационных поясах.

Таким образом, число частиц восстанавливается, функция распределения по питч-углам возвращается к прежнему виду. Но при том как возмущение в области радиационных поясов компенсируется, частицы, в результате этого попадающие в плотную атмосферу, вызывают там дальнейшие последствия магнитосферных возмущений./13/.

Существует такая особенность взаимодействия магнитосферы с солнечным ветром. В периоды спокойного Солнца действие корпускулярного излучения ослабляется благодаря отклонению в магнитосфере, но зато в годы активного Солнца частицы, попадающие в магнитную ловушку, разгоняются в ней, приобретают дополнительную энергию, и уже после этого высыпаются в атмосферу./6/.

Явления разной физической природы, вызывающие высыпание частиц, могут происходить одновременно, поэтому их влияние не выделяется однозначно. Их вклады в механизм саморегуляции радиационных поясов могут существенно отличаться в зависимости от особенностей всплеска солнечной активности и предварительного состояния околоземной плазмы. Кроме того, не исключается аналогичное следствие явлений, не имеющих прямой связи с солнечной активностью и даже имеющих искусственное происхождение.

Так, например, в /6/ приводится график зависимости интенсивности высыпания высокоэнергичных частиц из магнитного поля Земли в среднюю атмосферу после солнечной корпускулярной бури и после испытательного ядерного взрыва. Они практически совпадают.

Явления, влияние ОТС на которые
необходимо оценить.

Периодическое движение частиц радиационных поясов в магнитном поле Земли остается устойчивым, если внешнее воздействие приводит к достаточно медленным изменениям в системе./11/.

В радиационных поясах частица принимает участие сразу в 3-х видах периодического движения - это циклотронное вращение вокруг

магнитной силовой линии, колебания вдоль силовых линий из Северного полушария в Южное и обратно и дрейф вокруг Земли.

Тогда внешние воздействия, например, переменная составляющая, вносимая в магнитное поле, может нарушить устойчивость какого-либо из этих движений, если за период данного движения изменения в системе будут достаточно быстрыми./11/.

Период циклотронного движения - порядка микросекунд, колебаний вдоль геомагнитных линий - $10^{-3} \div 10^{-1}$ с, а долготного дрейфа - от нескольких минут до суток.

Единственное произвольное быстрое изменение магнитного поля произойдет при сбрасывании вакуумированной оболочки, когда к производимому ей самой, как ферромагнетиком, втягиванию геомагнитных линий прибавляется остаточное намагничение ротора после разгона в линейном электродвигателе.

Выше мы получили, что оба эти возмущения пренебрежимо малы уже на расстоянии 100 км от ОТС. Но расстояние от уровня сбрасывания оболочки / 100 км от земной поверхности/2// до радиационных поясов гораздо больше при расположении вдоль экватора /не менее 3000 км/ и никак не меньше в других широтах /на широте точек отражения - $100 \div 200$ км/.

Магнитные составляющие, вносимые токами, которые возникают в проводящем корпусе ОТС в результате движения в магнитном поле и суточных, а также более длительных вариаций геомагнитного поля и током, возникающим в электрическом поле, создающем экваториальную электрострую /14/, меняются достаточно медленно. С точки зрения влияния на динамику радиационных поясов эти токи и магнитные поля могут считаться квазистационарными и не вызовут высыпания частиц.

Кроме того, влияние периодического возмущения гораздо существеннее, чем непериодического, тем более - монотонного, как, например, рассмотренное выше изменение поля при сбрасывании оболочки.

В случае периодического внешнего воздействия устойчивость радиационных поясов может быть нарушена, если характерное время вариаций магнитного поля, например, период электромагнитных волн, не превышает одного из характерных времен движения частиц/9/.

Токи, которые могут быть наведены на поверхности ОТС геомагнитными пульсациями /см. ниже/, меняются быстро, но порождаемые ими магнитные поля направлены по правилу Ленца, и все их действие заключается в незначительном ослаблении амплитуды, которым на расстоянии можно пренебречь.

ДИФФУЗИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ

	Взаимодействие	Нарушает	Сохраняет	Вызывает
Квазирезонансные механизмы	Циклотронного движения с ОНЧ и КНЧ-волнами	M, J, Φ	Силую линию, кинетическую энергию /приблизительно/	Диффузию по питч-углам /в асимметричном поле также радиальную диффузию/
	Осцилляции вдоль силовых линий с микропульсациями типа Pc2, Pc3	J, Φ	M	Диффузию по питч-углам Радиальную диффузию
	Дрейфового движения с повторяющимися вариациями геомагнитного поля	Φ	M, J	Радиальную диффузию
Стохастические механизмы	Сжатие магнитосферы, вариации электрических полей внезапные изменения кольцевого тока и т.п.	Φ	M, J	Радиальную диффузию
	Кулоновские взаимодействия с атмосферой	M, J, Φ	Силую линию, кинетическую энергию	Диффузию по питч-углам /в асимметричном поле также радиальную диффузию/

Таблица заимствована из /9/.

M - магнитный момент частицы - 1-й адиабатический инвариант;
 J - всенаправленный поток частиц - 2-й адиабатический инвариант;
 Φ - магнитный поток через контур или дрейфовую оболочку - 3-й адиабатический инвариант.

Взаимная зависимость сохранения - несохранения адиабатических инвариантов и динамики частиц, захваченных магнитным полем, видна из таблицы.

Диффузия радиационных поясов.

Рассмотрим подробнее явления, вызывающие нарушения устойчивости движения частиц радиационных поясов и то, каким образом присутствие ОТС в ионосфере могло бы на них повлиять.

Существуют две основные категории диффузии радиационных поясов: радиальная и диффузия по питч-углам./9/

В результате радиальной /с уменьшением радиуса - расстояния от центра Земли/ диффузии частицы переносятся на дрейфовые оболочки, расположенные ближе к земной поверхности, где магнитное поле сильнее и частицы, таким образом, ускоряются.

Диффузия по питч-углам представляет собой статистическое уменьшение углов между вектором скорости и касательной к силовой линии. В результате этого точки отражения смещаются вдоль силовых линий в сторону полярных областей. Этот вид диффузии представляет собой основной механизм попадания захваченных магнитным полем частиц в область потерь в плотных слоях атмосферы./9/.

При уменьшении питч-угла сохраняется силовая линия, вдоль которой движется частица, а также ее кинетическая энергия.

В общем случае диффузия связана с необратимыми изменениями параметров движения частиц, которые могут быть вызваны, как уже упоминалось выше, неадиабатическими, т.е., достаточно быстрыми за период движения частиц временными вариациями магнитного поля или внешних сил /электрического поля/, взаимодействием с электро- и гидромагнитными волнами или столкновением с окружающей средой /атмосферой/.

Возмущения, вызывающие диффузию частиц радиационных поясов могут быть периодического или квазипериодического характера /например, взаимодействие с электромагнитными /ОНЧ/ и плазменными /КНЧ/ волнами/. Это может вызвать квазирезонансные эффекты на собственных частотах захваченных частиц./9/.

Могут быть также и стохастические причины диффузии /случайные сжатия магнитосферы, вариации электрических полей, столкновения частиц/.

Механизмы диффузии радиационных поясов приведены в таблице, заимствованной из /9/.

Т.к. высыпание частиц происходит только в результате диффузии по питч-углам, из указанных в таблице причин диффузии нас интересуют ОНЧ и КНЧ-излучения, геомагнитные пульсации типа Pc2, Pc3,

а также кулоновские взаимодействия с атмосферой.

Рассмотрим по порядку эти явления.

ОНЧ-/очень низкочастотные/ волны представляют собой распространяющиеся в плазме электромагнитные колебания, имеющие частоту от единиц до нескольких десятков герц. КНЧ- /крайне низкочастотные/ волны имеют частоту от 3 до 1000 Гц. Неоднозначность деления диапазона объясняется тем, что процессы генерации, а также характер взаимодействия волн с плазмой, который определяет поддиапазон, может оказаться различным для одной и той же частоты, если параметры плазмы отличаются./13/

Описанные выше явления, возвращающие к приблизительно постоянному уровню состав радиационных поясов и стабилизирующие функцию распределения по питч-углам после всплесков солнечной активности, относятся прежде всего к процессам генерации низкоширотных ОНЧ-шипений /шумов/ и их взаимодействию с захваченными электронами.

Аналогично тому, как частицы совершают колебания вдоль силовых линий, волны низких частот также удерживаются в каналах, создаваемых неоднородностями электронной концентрации вдоль силовых геомагнитных линий. Условие удержания в канале для ОНЧ-волн состоит в том, чтобы питч-углы /для волн - углы между волновым вектором и касательной к силовой линии/ не превышали $19^{\circ}28'$.

Было экспериментально установлено, что возбуждение низкоширотных /среднеширотных/ ОНЧ-шипений наблюдается одновременно с высыпанием электронов. Такая корреляция интерпретируется как результат взаимодействия электромагнитных волн с циклотронной составляющей движения в радиационных поясах.

Это взаимодействие выглядит следующим образом. Низкоширотные ОНЧ-шипения возбуждаются в экваториальной области плазмопаузы. в результате анизотропной деформации функции распределения сравнительно низкоэнергичных электронов по питч-углам. Изменение функции распределения заключается в том, что питч-углы под действием каких-либо причин увеличиваются.

При распространении в каналах вдоль силовых линий ОНЧ-волны взаимодействуют с электронами, что приводит к их диффузии по питч-углам /к их уменьшению/ и, т.о., возвращает функцию распределения в прежний вид.

Максимальная интенсивность, низкоширотных ОНЧ-шипений, измеряемая со спутников, приходится на 50° - 60° широты. Геомагнитные силовые линии, которые упираются в землю в этих широтах отстоят от зем-

ной поверхности на 1,4 - 4 земных радиуса. Именно в этой области происходит генерация волн./13, с.65-67/.

КНЧ-хоры /серии коротких сигналов с возрастающей частотой/ связываются с высыпанием электронов с энергией 40 кэВ и более.

Эти волны регистрировались в утреннем секторе зоны полярных сияний /60-80° широты/. Они распространялись по каналам вдоль силовых линий, причем удерживаются в них, проходя под большим углом к геомагнитным силовым линиям /более 50°/. А в ночном секторе они ослаблены в 10 - 100 раз и не наблюдались на широтах выше 15° в области силовых линий, которые входят в среднюю атмосферу в зоне полярных сияний и отстоящих в плоскости экватора приблизительно на 6 земных радиусов.

Такая особенность регистрации КНЧ-хоров объясняется тем, что эти каналы, представляющие собой неоднородности электронной концентрации, образуются в направлении вдоль силовых линий только в дневное время./13, с.87-88/.

КНЧ-хоры наблюдаются в спокойных условиях и при слабой возмущенности магнитного поля Земли. Силовые линии, которые упираются в землю в зоне полярных сияний, огибают радиационные пояса снаружи, и высыпания электронов, в данном случае, возможно, связаны не с радиационными поясами. Но, во всяком случае, на этом примере видно, что распространение низкочастотных волн в околоземном космосе помимо каналов вдоль силовых линий существенно затруднено.

Микропульсации типа Pc2 и Pc3, которые вызывают диффузию по питч-углам при взаимодействии с осцилляциями заряженных частиц вдоль силовых линий геомагнитного поля, представляют собой электромагнитные волны, распространяющиеся в плазме / в зависимости от свойств плазмы могут трансформироваться в магнитогидродинамические/, еще более низкочастотные, чем ОНЧ. Их частоты составляют доли герц. Они относятся к устойчивым геомагнитным пульсациям и связаны с магнитосферными бурями./13/.

Период геомагнитных пульсаций типа Pc2 составляет от 5 до 10 с. Их регистрация в средних широтах связана с началом геомагнитной бури. В сравнении с типами пульсаций, которые имеют более высокочастотные или менее высокочастотные диапазоны, Pc2 изучены мало. Для нашего случая важно, что источник их генерации локализуется в экваториальной плоскости, а распространение происходит вдоль силовых линий. Это установлено из факта одновременной регистрации соответствующих сигналов в магнитно-сопряженных /т.е., имеющих

одинаковую геомагнитную широту в разных полушариях и одну долготу/ точках./13/.

Геомагнитные пульсации типа Pc3, период которых составляет от 10 до 40 с, характерны для возбужденной магнитосферы. Они имеют 2 максимума, первый из которых приходится на 55° - 62° широты - силовые линии, которые упираются в эту область, проходят сквозь плазмосферу. Широты второго максимума - от 65° до 68° . На эту область по силовым линиям проецируется кольцевой ток. Т.о., источники генерации разделяются плазмопаузой. Распределение потоков для этих максимумов различается. В первом случае наблюдаются локальные потоки, а во втором - широкая пульсирующая область. Во время усиления солнечной активности происходит общее смещение максимумов в более низкие широты. Это соответствует перестройке структуры магнитосферы./13/.

С ионно-циклотронной неустойчивостью во внешнем радиационном поясе, которая также не исключает возникновения диффузии по питч-углам, связываются устойчивые геомагнитные пульсации типа Pc1 с периодами от 0,2 до 5 с. Их происхождение до конца не выяснено и считается спонтанным, а область возбуждения предполагается в магнитосфере /выше плазмопаузы/. Наблюдаются микропульсации Pc1 на всех широтах - от полюса до полюса, тогда как волны, зарождающиеся в магнитосфере, должны регистрироваться на Земле в высоких широтах, куда они попадают в результате распространения вдоль силовых линий геомагнитного поля.

Особенность регистраций геомагнитных пульсаций типа Pc1 объясняется тем, что от полюсов к экватору пульсации распространяются по ионосферному волноводу. Изменение электронных концентраций в ионосфере образует отражающий слой на высоте 300 км от земной поверхности. Это подтверждается экспериментально. Существование МГД-волновода установлено по времени регистрации сигналов на разных широтах./13/.

ОТС в экваториальной ионосфере.

КНЧ и ОНЧ-излучения, которые распространяются по каналам вдоль геомагнитных силовых линий, далеко обходят область экваториальной ионосферы и вопрос о влиянии ОТС в этом случае не возникает.

ОНЧ-волны, питч-углы которых превосходят $19\ 28$, распространяются не по каналам вдоль геомагнитных линий. Часть их оказывается

захваченной в области магнитосферы, на больших высотах./13/.

Но даже если какая-то доля этих волн будет распространяться в сторону Земли, присутствие ОТС в ионосфере не способствует их захвату в каналы и включению во взаимодействие с частицами радиационных поясов.

Действительно, волны, генерируемые в экваториальной плазмосфере и плазмопаузе, распространяясь под большими углами к силовым линиям либо отражаются от нижележащих слоев, когда углы между волновым вектором и силовой линией достигают 90° , либо захватываются в каналы, когда достигают силовых линий, касательные к которым достигают с волновым вектором достаточно малый угол. Те же, которые не отражаются вверх и не захватываются, отклоняются достаточно далеко от экваториальной плоскости. Они если и достигают ионосферы или земной поверхности, то на достаточно высоких широтах.

При распространении как Pc2, так и Pc3 происходят сложные преобразования поляризации на плазменных неоднородностях. Тем не менее, геомагнитные пульсации обоих типов распространяются от экваториальной плоскости плазмосферы и отстоящих еще дальше от Земли областей вдоль силовых линий к средним и высоким широтам и, т.о., очевидно, также не могут испытывать влияние присутствия ОТС в экваториальной ионосфере.

Геомагнитные пульсации Pc1 распространяются из области генерации вдоль силовых линий геомагнитного поля до высоких широт, а затем к экватору по ионосферному волноводу. Если вокруг ОТС возникает возмущение электронной концентрации, оценим размеры области, в которой оно возникает, чтобы судить о том, может ли присутствие ОТС в стенке ионосферного волновода нарушить однородность отражающего слоя и повлияет ли это на динамику радиационных поясов.

Размеры неоднородности, вносимой ОТС в плазму ионосферы.

Экспериментальные исследования с искусственными спутниками Земли показали, что вокруг твердого тела в приземной, в том числе, ионосферной, плазме создается неоднородность. Она вызывается движением тела, а также различием скоростей ионов и электронов, которое сказывается на результате статистики соударений с его поверхностью./15/.

Рассматривая ОТС как спутник бесконечной длины, оценим размеры неоднородности, которую оно может внести в плазму ионосферы, пользуясь обобщенными результатами экспериментов со спутниками.

Согласно /15/, максимальное возмущение электронной концентрации наблюдается за спутником на поверхности конуса, угол раствора которого составляет $2 \arcsin \frac{v_i}{v_0}$, где v_i - скорость ионов в плазме, а v_0 - скорость спутника. /15, с.130/. Размеры неоднородности в плазме, вызываемые присутствием искусственного тела не превышают длины свободного пробега, которая в ионосфере может достигать сотен метров и даже километров. /15, с.115/.

Тогда достаточно правомерно ограничить предполагаемую неоднородность, вносимую ОТС, поверхностью цилиндра /локальное приближение тора/, который заметает такой конус при перемещении вдоль ОТС, если высоту конуса ограничить длиной свободного пробега.

Из /15, с.19-20, табл.1.2/ средняя скорость ионов на высоте 300 км $v_i = 1$ км/с, тогда если скорость ОТС $v_0 = 10$ км/с, $\frac{v_i}{v_0} = 0,1$. Длину свободного пробега возьмем равной 1км, тогда радиус неоднородности, равный длине свободного пробега, умноженной на тангенс половины угла раствора, составляет около 100 м.

Отметим, что основной вклад в образование неоднородности вносят механическое сжатие среды передним фронтом тела и разрежение сзади. ОТС не имеет передней и задней поверхностей, а взаимодействует со средой только боковой поверхностью.

Так что при отсутствии выступающих деталей ОТС может больше походить на квазипокоящееся в плазме тело, которое вообще не вызывает в плазме заметно протяженной неоднородности. /15/.

Тем не менее, оценка с приближением по избытку представляется пока более надежной.

Теперь оценим длину волны геомагнитных пульсаций, чтобы сравнить ее затем с поперечником плазменной неоднородности. Известно, что неоднородность повлияет на распространение колебаний только в том случае, если ее поперечник превосходит длину волны или сравним с ней.

Т.к. геомагнитные пульсации относятся к магнитогидродинамическим волнам /13/, можно ожидать, что их длины волн заметно превзойдут поперечник плазменной неоднородности, т.к. в магнитогидродинамике длина свободного пробега частиц мала по сравнению с расстояниями, на которых заметно меняются макроскопические характеристики движения.

Геомагнитные пульсации распространяются вдоль силовых линий

магнитного поля, поэтому для нахождения фазовой скорости воспользуемся формулой Альвена, которая дает значение скорости магнитогидродинамических волн, волновой вектор которых направлен вдоль магнитного поля/11/:

$$v_A = \frac{B}{(\mu_0 n M)^{\frac{1}{2}}}$$

где B - модуль вектора магнитной индукции, n - концентрация плазмы, M - масса протона, равная $1,67 \times 10^{-27}$ кг, μ_0 - магнитная постоянная, равная $1,257 \times 10^{-6}$ В·с/А-м.

Взяв значение $B=6 \times 10^{-5}$ Тл в ионосфере, а концентрацию - 10^{14} м^{-3} , получим, что

$$v_A = 130955,9 \text{ м/с},$$

тогда длина волны, получаемая по формуле

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi v_A}{\omega}$$

для $Pc1$, период которых

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

меняется от 0,2 до 5 с, равна от 26191 м до 654779 м.

Таким образом, длина волны по меньшей мере в 100 раз больше поперечника неоднородности в плазме ионосферы, которая может возникнуть вокруг ОТС. Следовательно, ОТС независимо от широты расположения не должно оказать влияние на распространение геомагнитных пульсаций $Pc1$.

ОТС в высоких широтах.

Покажем, что и в высоких широтах ОТС не вызовет нежелательного влияния на процессы в возбужденной магнитосфере.

Волны, взаимодействие с которыми приводит к высыпанию частиц из радиационных поясов, распространяясь от вершин силовых линий /экваториальной плоскости/ к высоким широтам, затем отражаются от ионосферы./13/.

Каналы, по которым распространяются волны в магнитосфере, образуются на расстоянии не менее 0,7 радиуса Земли от ее поверхности /13/. Это составляет не менее 4000 км. А т.к. на высоте 1000 км

ионосфера переходит в плазмосферу, остается зазор около 3000 км, в котором распространение волн происходит вне каналов и после отражения волна может быть захвачена в другой канал или в волновод между земной поверхностью и ионосферой./13, с.45/.

Для того, чтобы судить о возможном влиянии ОТС, необходимо оценить длины ОНЧ и КНЧ-волн и сравнить их с полученным выше поперечником области возмущения в плазме около ОТС.

Чтобы найти волновое число k для электромагнитных волн, распространяющихся в плазме вдоль силовых линий магнитного поля, воспользуемся дисперсионным уравнением для обладающей такими свойствами вистлерной моды, имеющим следующий вид /11/:

$$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_p^2 / \omega^2}{1 - (\omega_c / \omega)},$$

где c - скорость света, ω_p - плазменная частота, вычисляемая по формуле

$$\omega_p = \left(\frac{n e^2}{\epsilon_0 m} \right)^{\frac{1}{2}}$$

а ω_c - циклотронная частота, вычисляемая по формуле

$$\omega_c = \frac{e B}{m}.$$

Здесь e - заряд электрона, равный $1,6 \times 10^{-19}$ Кл, m - масса электрона, равная $0,91 \times 10^{-30}$ кг, n - концентрация плазмы, ϵ_0 - электрическая постоянная, равная $8,85 \times 10^{-12}$ Кл/Вм, B - магнитная индукция.

Тогда длина волны, частота которой $\frac{\omega}{2\pi} = 3$ Гц, в магнитосфере, где $B = 10^{-8}$ Тл, $n = 10^8$ м⁻³, принимает значение 32128 м, примерно в 150 раз больше характерного размера неоднородности.

В ионосфере, где $B = 6 \times 10^{-5}$ Тл, $n = 10^{14}$ м⁻³, длина волны при той же частоте равна 2442 м, что примерно в 10 раз больше поперечника неоднородности.

Значит, на характер распространения излучения такой частоты присутствие ОТС в высоких широтах не повлияет.

Для КНЧ-волн с частотой 1000 Гц в ионосфере длина волны получается равной 134 м, это несколько меньше, чем характерный размер неоднородности.

Нарушая отражение от ионосферы, неоднородность, вносимая ОТС, может вызвать либо поглощение, либо пропускание излучения, а это не усилит результат его взаимодействия с частицами радиационных

поясов; либо небольшое рассеяние, в результате которого для некоторой части излучения вероятность захвата в канал и попадания в область взаимодействия с радиационными поясами уменьшится.

В случае захвата в ионосферный волновод низкочастотных волн неоднородность около ОТС может вызвать местное пропускание. Но тогда плазма ионосферы, находящаяся за неоднородностью, которая имеет и большую толщину, и больший показатель преломления, опять вызовет отражение. Кроме того, в магнитосфере вне волновода такое излучение не распространяется, подстановка в дисперсионное уравнение дает мнимый показатель преломления. Так что и утечка из ионосферного волновода, не приводящая к захвату в соответствующие каналы, не усилила бы высыпание частиц радиационных поясов.

Геомагнитные пульсации Pc2 и Pc3 также могут отражаться от ионосферы. Но длины волн для них в ионосфере и в магнитосфере, рассчитанные так же, как и для Pc1, намного превышают поперечник неоднородности, так что на них ОТС не влияет.

ОТС и кулоновское рассеяние частиц радиационных поясов.

О том, что ОТС в экваториальной ионосфере не будет влиять на условия кулоновского взаимодействия частиц радиационных поясов с атмосферой, можно заключить уже из самых общих представлений об этом процессе.

Заряженные частицы, приближаясь к точкам отражения при осцилляциях вдоль силовых линий, могут испытывать рассеяние на атмосферных частицах. Причем больше всего способствует диффузии кулоновское столкновение разноименно заряженных частиц./11, с.175/.

А т.к. во время магнитосферных суббурь увеличивается ионная и электронная концентрация ионосферы, понятно, что тогда и заметно увеличивается диффузия по питч-углам как результат кулоновского взаимодействия и последующее высыпание частиц.

Т.к. точки отражения радиационных поясов находятся в средних и высоких широтах, ОТС, расположенное вдоль экватора, очевидно, не влияет на интересующие нас процессы.

В высоких широтах если полоса, на которой происходит кулоновское взаимодействие частиц радиационных поясов с частицами ионосферы составляет 5° по широте, сквозь плазму, на состояние которой

может повлиять ОТС, пройдет только $3,5 \times 10^{-4}$ часть потока, который дойдет до соответствующей высоты. Кроме того, согласно /15/, неоднородность в плазме ионосферы, вносимая присутствием твердого тела, заключается в некотором уменьшении электронной концентрации. Значит, влияние ОТС, и без того незначительное, представляет собой некоторое уменьшение высыпания протонов.

Возможность возбуждения волн самим ОТС.

Рассмотрим возможность возбуждения каких-либо волн в плазме самим ОТС. Хотя каналы вдоль силовых линий находятся на расстоянии почти $0,7$ земного радиуса /минус высоту подъема/, и в случае генерации в экваториальной ионосфере волновой вектор направлен к нему под большим углом, т.е.; волна должна отразиться, если дойдет без затухания, может быть, придется рассматривать возможность ее распространения к высоким широтам по ионосферному волноводу, как, например, для геомагнитных пульсаций Pc1.

Скорость подъема ОТС может быть относительно небольшой, но тангенциальная скорость равна первой космической как для ротора, освобожденного от вакуумированной оболочки, так и для корпуса стационарного ОТС, который по мере подъема приобретает часть момента количества движения ротора.

Средняя скорость ионов в плазме ионосферы - порядка 1 км/с /15/, т.о., орбитальное движение ОТС со скоростью около 8 км/с является сверхзвуковым и должно возбуждать ионно-звуковые волны, частота которых определяется свойствами плазмы и скоростью тела./15/.

Действительно, дисперсионные соотношения для такого рода волн были обнаружены при теоретическом анализе формы плазменной неоднородности, которая образуется в окрестности искусственного спутника Земли. Наглядной иллюстрацией такой связи может служить то, что в изотермической плазме /когда ионные и электронные температуры совпадают/, где сильное затухание ионно-звуковых волн, след имеет расплывчатую форму, а в неизотермической плазме, где затухание слабое, форма следа имеет ярко выраженную лепестковую структуру. Возмущение электронной концентрации в окрестности быстро движущегося тела трактуется как результат черенковского возбуждения ионно-звуковых волн./15, с.135/

Но выше мы нашли, что радиус неоднородности, т.е., расстояние, на котором такие волны затухают, не превышает 100 м.

А независимо эти волны не регистрируются, так что область их распространения ограничивается этим расстоянием.

Таким образом можно заключить, что присутствие ОТС в ионосфере не должно вызвать экологически значимых последствий вне зависимости от возбуждения магнитосферы. Возможности других неблагоприятных воздействий, кроме влияния на силовые линии, распространение излучений и движение частиц в магнитном поле ожидать как будто не приходится.

Электробезопасность эстакады во время гроз. Анализ возможности использования энергии молний для установки глобальной протяженности. Оценка токов вдоль проводящей обшивки, вызванных разностью потенциалов в окружающей среде. Электробезопасность ОТС на подъеме. Отличие от земной электробезопасности.

Энергетика ионосферы и гроз.

В /1/ в качестве одного из источников энергопитания для ОТС предлагается использовать энергию токов ионосферы и разность потенциалов между земной поверхностью и ионосферой.

Характерные поперечники сечения ионосферных токов достигают по меньшей мере многих десятков километров. Экваториальный струйный электроток, который протекает в ионосфере на высоте от 90 до 130 км, отклоняясь на 35° от геомагнитного экватора /пересекает географический под углом около 11° /, достигает значения 10^4 А./14/.

Природа причин, вызывающих этот ток, выяснена не до конца./14/. Представив, что на заряженные частицы ионосферы действует квазистационарное электрическое поле, можно оценить ток, который пойдет по проводящей оболочке ОТС, т.к. разность потенциалов остается той же, она равна произведению известных нам силы тока и проводимости струи, равной 200 Ом^{-1} . Проводимость ОТС можно найти, зная удельное сопротивление железа - $9,7 \times 10^{-8} \text{ Ом м}$. Сечение известно, а длину проводника можно вычислить, зная протяженность тока вдоль экватора : $30 \div 50^\circ$, редко 100° .

Для площади сечения 10^{-2} м^2 выходит от 1104 до 18498 Вт, для 10^2 то же, умноженное на 10^4 . Мощность тока самой электроструи не превышает 10^6 Вт. Этого явно недостаточно для ОТС, которому требуется около 4×10^7 кВт - 1кВт на погонный метр по экватору.

Разность потенциалов между земной поверхностью и электросферой равна 400 000 В. Она постоянно поддерживается, в противном случае токи проводимости атмосфере достаточно быстро разрядили бы ее. В /5/ определяется время разрядки конденсатора Земля - ионосфера от наблюдаемого заряда 10^5 Кл до интересующего нас значения, если представить, что механизм возобновления выключен.

Зная время разрядки и получая энергию конденсатора по формуле

$$W = \frac{1}{2} Q U,$$

где U - разность потенциалов, а Q - заряд, можно оценить мощность

механизма, возобновляющего разность потенциалов.

Так, до заряда 0,1 Кл, т.е., в 10^6 раз земная поверхность разрядилась бы за

$$t = 55 \text{ км} 10^6 = 759 \text{ с}$$

т.к. энергия

$$W = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot 10^5 = 10^{10} \text{ Дж}$$

то мощность механизма, поддерживающего разность потенциалов получается равной 26350 кВт.

Зная мощность ОТС, можно заключить, что энергии 2×10^{10} Дж хватит только на 0,49 с работы такой установки, тогда как на возобновление энергии понадобится $759 \text{ с} = 12,6$ минут.

Согласно /16/, при измерении токов проводимости атмосферы до сих пор допускалась ошибка – на самом деле плотность токов в 2 раза больше. Чтобы сделать соответствующую поправку в расчете мощности механизма возобновления разности потенциалов, коэффициент 55 в формуле для нахождения , который получен как произведение емкости и сопротивления всей атмосферы, нужно разделить на 2. Значит, время разрядки или возобновления разности потенциалов будет равно 6,3 мин., а мощность все равно недостаточна для ОТС.

Природа механизма, поддерживающего разность потенциалов между поверхностью Земли и ионосферой, достаточно хорошо изучена. Разряды молний на землю, которые происходят во время гроз, извержения вулканов и пылевые бури, когда движение воздушных масс вызывает разделение зарядов в жидких и твердых аэрозолях, отрицательно заряжают земную поверхность. Кроме того, в предгрозовое время вносят свой вклад токи с острий. Их направление противоположно направлению токов разрядки, т.к. приземный градиент потенциала под грозовой тучей меняет знак и по мере ее созревания возрастает в абсолютном значении. Таким образом, наблюдаемый заряд Земли поддерживается постоянным./5/.

Ведущая роль в этом комплексе явлений принадлежит грозам.

Во время гроз 65% разрядов молний происходят внутри облаков, а остальные – между облаками и землей, причем часть из них заряжает земную поверхность положительно./8/. Т.о., общая энергия гроз может превышать энергию конденсатора Земля – электросфера.

Оценим среднюю мощность грозового механизма и сравним с мощностью, требуемой ОТС.

Данные разных источников неоднозначны. Так, в /19/ приводится

значение мощности глобального грозового механизма 2×10^6 кВт. Это 5% мощности ОТС.

В /18/ содержится задача аналогичного содержания. Требуется найти мощность глобального грозового механизма и общую мощность разрядов на земную поверхность, если 69% разрядов происходят в облаках, а 31% - на землю /это несколько отличается от данных из /8//, средняя сила тока в разряде I равна 20 000 А, разность потенциалов $\Delta\varphi = 10^7$ В, а среднее время основного разряда $t = 10^{-3}$ с, и на всей Земле за секунду в среднем происходит 118 разрядов молний.

Энергию одного разряда получим по формуле

$$W = I \Delta\varphi t$$

Умножив результат на 118, получим энергию всех разрядов за 1с, т.е., мощность, которая равна $2,36 \times 10^7$ кВт; 31% от нее, т.е., мощность разрядов на землю, равна $7,31 \times 10^6$ кВт.

Решение разобрано так подробно потому, что ответы в конце задачника - соответственно, $2,4 \times 10^{13}$ кВт и $7,2 \times 10^{12}$ кВт. Такие ответы выходят, если, вычисляя энергию молнии, произведение, т.е., мощность разряда, разделить на . Видимо, это ошибка.

Источник, дающий 50% необходимой мощности, заслуживает внимания, тем более, что это - еще не окончательная оценка.

Общие соображения об использовании энергии разрядов молний встречаются в литературе /8,18,19,20/. Обычно эта мысль оценивается скептически./18,19,20/, в /8/ просто сказано, что энергия молний пока не используется.

В /8/ мощность глобального грозового механизма оценивается в 2 млрд.кв. Если это - киловатт, то можно использовать энергию молний для энергопитания ОТС с самого начала, однако, как это значение получено, после решения задачи из /18/ не вполне ясно. Может быть, это не усредненная за сутки мощность молний, а сумма мощности всех разрядов, происходящих на Земле в 1 секунду.

Основания для скептических оценок /18,19,20/ следующие. Плотность разрядов молний в умеренных широтах - от $2 \div 5$ до $20 \div 25$ на км^2 в год./8,18,19,20,21/. Согласно /20/, применяя для улавливания молний тросы, поднятые над землей на 400 - 800 м, в местности с 20 грозовыми днями в году удастся поймать 20 - 25 разрядов. Таким образом, главный недостаток молнии как источника энергии - нестабильность.

Но при этом не рассматривались установки многокилометровой про-

тяженности. Действительно, специально электростанцию большой протяженности нецелесообразно. Но для ОТС это - дополнительная функция.

Пользуясь картой, приведенной в /21/, где дано распределение общего числа разрядов молний в год на км², и зная среднюю энергию заряда, оценим среднюю мощность всех молний над полосой шириной 1 км вдоль экватора.

Даже взяв 200 разрядов на км² в год и энергию молнии 10^{10} Дж /оба значения максимальные, над океанами число разрядов гораздо меньше/ и предположив, что сможем улавливать также и разряды в облаках, получим на погонный метр 63,4 Вт - не более 1/16 мощности ОТС.

Т.о., энергия молний, улавливаемых наземной системой грозозащиты не внесет существенного вклада в обеспечение мощности ОТС.

Так как для того, чтобы разогнать ротор ОТС, достаточно одной крупной ГЭС, вопрос о возможности или целесообразности использования с этой целью ионосферы или глобального грозового механизма не является решающим. Однако предварительная оценка, сделанная выше, может быть полезной.

Грозозащита ОТС.

Эстакада должна быть защищена, как всякое наземное сооружение, системой молниеотводов. Другая, менее традиционная задача - обеспечить безопасность ОТС на подъеме. Здесь должен быть использован опыт молниезащиты самолетов и учтена специфика ОТС: большая протяженность, особенности формы и движения.

Анализ статистики показал, что наблюдаемая частота поражения самолетов молниями не может определяться только случайностью. /25/.

Оценка вероятности поражения самолета молнией, возникающей независимо от самолета, выглядит следующим образом /25/.

Если обозначить объем облака w_0 , а "объем поражения" $w_1 = L_m S_c$, где L_m - средняя длина главного канала молнии, а S_c - площадь самолета в плане, то вероятность P_T поражения самолета молнией найдем из соотношения

$$P_T = \frac{w_1}{w_0} \cdot n = \frac{L_m S_c}{w_0} n,$$

где n - число молний в облаке за время прохождения в нем самолета.

Обозначая интервал времени, через который повторяются разряды

молний в данном облаке τ , характерный размер самолета l_c , скорость его движения w , длину облака в направлении движения самолета d_0 , имеем:

$$P_T = \frac{L_m \pi l_c}{4 w} \frac{d_0}{w \tau}$$

Здесь толщина канала ствола не учитывается, т.к. она существенно меньше характерного размера самолета.

Принимая $w_0 = 10 \times 10 \times 10 \text{ км}^3$, $L_m = 10 \text{ км}$, $\tau = 10 \text{ с}$, $l_c = 30 \text{ м}$ и $w = 500 \text{ км/ч}$ получим, что $P_T < 10^{-4}$, т.е. на 10000 проходов грозовых облаков самолетами должно приходиться одно прямое поражение главным каналом молнии.

В действительности наблюдаемая вероятность - порядка $1 \div 2 \times 10^{-2}$.

Несоответствие может быть объяснено тем, что экипажи кораблей, попавших в грозовые облака, если это не привело к разрушениям, умалчивают об этом событии. Но /25/ не допускается возможность скрыть более 50% попаданий в грозовое облако при существующих сведениях о метеорологической обстановке.

Принятые выше данные для расчета вероятности даже несколько завышают ее, т.к. линейные горизонтальные размеры грозового облака обычно больше принятых в 2-3 раза, частота следования молний в умеренных широтах в одном грозовом облаке обычно не превышает 3 - 4 молний в минуту. Так что расчетная вероятность никак не занижена из-за приближенности данных, а даже несколько завышена.

Кроме того, случаи поражения молниями наблюдались и в слоисто-дождевых облаках, где в естественных условиях не бывает разрядов молний.

Все это объясняется тем, что в облаках самолеты электризуются, и напряженность поля приобретенного заряда может достигать значений, достаточных для поджига молнии. Энергии электрического поля самолета недостаточно для поддержания разряда, однако в некоторых зонах внутри не только кучевых, из которых формируются грозовые, но и слоисто-дождевых облаков создаются электрические поля, еще недостаточные для поджига молний, но достаточные для поддержания разряда. В таких зонах происходят поражения самолетов молниями, которые сами самолеты и вызывают. /25, 26/

ОТС намного превзойдет самолеты и по площади в плане, которая определяет "геометрическую" вероятность поражения молнией, и по площади контакта со средой в облаке, от которой зависит электризация. С другой стороны, большая протяженность ОТС должна быть

использована при решении задачи грозовой безопасности.

Рассмотрим сначала общий случай электризации твердого проводящего тела в облаках.

Исследования физических явлений, вызывающих электризацию самолетов, показали следующее. Объемный заряд облака создает только 0,01 – 1% тока, текущего на самолет. Баллоэффект, представляющий собой разноименное заряджение крупных и мелких капель или частиц снежинок, после того, как они разбиваются при ударе о самолет или воздушную подушку, определяет не более нескольких процентов этого тока. Природа электризации самолетов, во всяком случае, на дозвуковых скоростях, определяется главным образом, контактной разностью потенциалов между поверхностью самолета и аэрозольной средой в облаках и осадках. Значение баллоэффекта несколько возрастает после прохождения звукового барьера./25, с.152-153/

Контакт ОТС с облачной средой тоже должен привести к электризации. Исходя из того, что ОТС не имеет воздушной подушки и переднего фронта, о которые могли бы разбиваться частицы облачного аэрозоля, можно заключить, что для него влияние баллоэффекта должно быть еще меньше, чем для самолета.

Расчетная оценка токов электризации в результате контактной разности потенциалов превышает токи, наблюдаемые экспериментально из-за токов разрядки в результате проводимости атмосферы./25/.

Оценивать возможную электризацию ОТС будем, как если бы она происходила только из-за контактной разности потенциалов.

Интегральный ток на самолет возрастает пропорционально скорости и площади поверхности самолета. Это и понятно: с увеличением скорости усиливается контакт со средой, кроме того, общий ток пропорционален площади поперечного сечения проводника. Но строгого аналитического соотношения для этой закономерности не установлено./25, с.163/.

Площадь поверхности контакта ОТС со средой много больше, чем у самолета – длина контактирующего с аэрозолем фрагмента ОТС определяется протяженностью облака.

Скорость корпуса ОТС относительно среды по мере передачи момента количества движения от ротора возрастает. При равномерном линейном ускорении за время подъема на орбиту, высота которой 300 км с вертикальной скоростью 20 м/с тангенциальная скорость корпуса должна возрасти от 0 до 8 км/с. Тогда на высоте нижней границы грозовой облачности, допустим, равной 2 км, она принима-

ет значение 51 м/с, а на высоте верхней границы, допустим, 12 км, скорость равна 320 м/с. Эти скорости сравнимы со скоростями самолетов.

Значение максимального заряда, который может приобрести самолет, кроме контактной разности потенциалов определяется электроемкостью самолета.

Потенциал, относительно облачной среды, который приобретает тело в результате контактной разности потенциалов, может быть оценен по формуле /25/:

$$V = V_k \frac{R}{\delta},$$

где V_k - контактная разность потенциалов, которую оценивают в 1 В, R - характерный линейный размер, в качестве которого можно взять радиус шара, имеющего такую же площадь поверхности, δ - расстояние, на котором прекращается обмен зарядами между телом и средой, которое обычно принимают равным $10^{-7} \div 10^{-6}$ см./25/.

Для подстановки необходимо значение R для ОТС. Площадь контакта определяется горизонтальной протяженностью облака. Для кучево-дождевого облака она составляет около 10 км, для слоисто-дождевого 100 ÷ 1000 км. Тогда характерные линейные размеры:

для диаметра поперечного сечения	1 м	10 м
в кучево-дождевых облаках	50 м	158 м
в слоисто-дождевых облаках	158 м	500 м

Следовательно, разность потенциалов, значение которой получим после подстановки в формулу:

в кучево-дождевых облаках	$50 \times 10^8 \div 10^9$ В	$158 \times 10^8 \div 10^9$ В
в слоисто-дождевых облаках	$158 \times 10^8 \div 10^9$ В	$500 \times 10^8 \div 10^9$ В

Электроемкость ОТС, когда оно рассматривается как объект, контактирующий с облачной средой, определяется не только площадью контакта, а всей площадью поверхности, замкнутой с той, которая находится внутри облака. Для самолета, очевидно, эти поверхности

совпадают.

Замыкать или изолировать друг от друга части проводящей оболочки достаточно просто. Решать, что целесообразнее, следует, исходя из требования уменьшить поверхностную плотность заряда, которая, по-видимому, определяет риск поражения молнией, т.к. напряженность электрического поля зависит от поверхностной плотности.

При условии равенства площадей контактных поверхностей большая емкость целесообразнее. Интегральный ток зарядки зависит от площади контакта, а приобретенный заряд распределяется по всему проводнику так, чтобы удовлетворить условию эквипотенциальности. Значит, пока заряд не достиг максимального значения, его поверхностная плотность будет меньше, если поверхность ОТС будет представлять собой сплошной проводник. Когда набран максимальный заряд, поверхностная плотность заряда будет для обоих случаев одинаковой. Но при одинаковых значениях тока электризации время приобретения максимального заряда больше для большей емкости.

Оценим емкость всей проводящей поверхности ОТС. Поверхность тора можно в данном случае заменить цилиндрической с образующей, равной длине экватора - около 4×10^7 м. Емкость в пикофарадах приблизительно равна радиусу сферы той же площади в сантиметрах. Тогда имеем:

для диаметров сечения	1 м	10 м
емкость	0,316 мкФ	1 мкФ
Тогда максимальные заряды, получаемые как произведение емкости на разность потенциалов		
для кучево-дождевых облаков	$15,8 \times 10^2 \div 10^3$ Кл	$158 \times 10^2 \div 10^3$ Кл
для слоисто-дождевых облаков	$50 \times 10^2 \div 10^3$ Кл	$500 \times 10^2 \div 10^3$ Кл.

Оценим, какую его часть ОТС наберет за время подъема.

Согласно данным из /25, с.140, табл.3.7/, результирующий ток в облаке на самолет - порядка 10^{-6} А, а ток, текущий с самолета через струю отработанных газов приблизительно на 2 порядка больше. Значит, если бы струи отработанных газов и, соответственно, тока через нее, не было, ток на самолет был бы порядка 10^{-4} А, тогда на участок ОТС длиной около 10 км - 1 А, 100 км - 10 А, т.к. ток про-

порционален площади поверхности. Примерно такой же ток, как через струю отработанных газов, стекает через разрядники.

Тогда за 750 с подъема сквозь облака в кучево-дождевом облаке ОТС приобретет 75 Кл. Слоисто-дождевые облака расположены ниже - от 100 м над земной поверхностью, верхняя их часть на высоте 1 км. ОТС пройдет сквозь них не более, чем за минуту, а заряд, который будет при этом приобретен за 50 с равен 500 Кл.

По мере подъема возрастает скорость и быстро меняются условия в облаках как с высотой, так и в горизонтальном направлении. Водный аэрозоль сменяется снежным, так что может успеть поменяться и знак заряда или какая-то его часть скомпенсируется. Но т.к. приобретаемый заряд существенно меньше максимально возможного, преимущество большой емкости остается в силе.

Если предположить, что послеполуденная гроза на экваторе продолжается 5 часов, а в остальные часы суток погода ясная, то облачность занимает вдоль экватора $5/24$ частей. Эта же дробь определяет отношение поверхностных плотностей зарядов в зависимости от того, сосредоточен заряд на контактной поверхности или может растекаться по всей поверхности ОТС. Снижение напряженности поля почти в 5 раз довольно значительно, но еще недостаточно. Требуется снизить напряженность не менее, чем в 10 раз. Но для более локальной облачности эффект будет значительнее.

Кроме того, известно, что заряд распределяется по поверхности самолета неравномерно из-за сложной формы с множеством выступающих и заостренных частей. Напряженность поля, создаваемая некоторыми участками поверхности, превышает среднюю более чем в 10 раз. Поражение молниями именно этих участков происходит с наибольшей вероятностью. /25,26/.

Если ОТС не будет иметь выступающих и заостренных частей, то это заметно снизит приповерхностный потенциал и, следовательно, вероятность поражения молнией.

Мощность тока электризации может достигать и превосходить величину мощности двигателей разгоняющих ротор, равную 4×10^7 кВт.

для диаметра сечения	1 м	10 м
в кучево-дождевых облаках	$5 \times 10^6 \div 10^7$ кВт	$1,58 \times 10^7 \div 10^8$ кВт
в слоисто-дождевых облаках	$1,58 \times 10^8 \div 10^9$ кВт	$5 \times 10^8 \div 10^9$ кВт

Но т.к. время прохождения сквозь кучево-дождевые облака - 750 с,

а в слоисто-дождевых - еще меньше, использование энергии электризации не оправдывает затрат на разгон.

Меры грозовой безопасности для самолетов.

Рассмотрим разработанные для самолетов меры грозовой безопасности.

Средства, уменьшающие заряд, приобретаемый самолетом, направлены либо на уменьшение токов, заряжающих самолет, либо на увеличение токов разрядки./25/.

Токи на самолет регулируют, подбирая материал покрытий так, чтобы получить наиболее благоприятное значение контактной разности потенциалов. Как быстрота приобретения заряда, так и его знак зависят от свойств вещества поверхности и облака - соотношения в нем количества водяных капель и кристаллов льда, их размеров, температуры. Рекомендуется избегать сред, неблагоприятных для данного покрытия, подбирать покрытия, наиболее подходящие для сред, соответствующих типичным для данной модели высотам. Это не слишком надежная мера, т.к. заряд самолета и контактная разность потенциалов могут резко меняться, если на поверхность попадают, к примеру, брызги грязи./25/.

В /25/ предлагается снабдить самолеты шторками, покрытие которых имеет со средой контактную разность потенциалов, противоположную по знаку той, которую создает материал самолета. Регулируя их площадь, можно повлиять на течение электризации. Если контактная разность потенциалов основного покрытия меняет знак при переходе из водного аэрозоля в ледяной, что, например, имеет место для дюрала, шторки должны быть более сложными, но принцип их действия остается прежним.

Последняя мера, как более универсальная, является более подходящей для ОТС. Избегать же неблагоприятных сред можно не во время полета, а только выбирая время начала подъема так, чтобы над эстакадой не было гроз и потенциально опасной облачности.

На токи разрядки самолета, как обусловленные проводимостью ионизированного воздуха, так и вызванные дополнительными мерами - от проводимости выхлопных струй до электронной эмиссии, влияет скорость самолета. Точнее, то, что он все время выходит из создаваемого им объемного заряда, так что объемный заряд может не учитываться в расчетах.

а в слоисто-дождевых - еще меньше, использование энергии электризации не оправдывает затрат на разгон.

Меры грозовой безопасности для самолетов.

Рассмотрим разработанные для самолетов меры грозовой безопасности.

Средства, уменьшающие заряд, приобретаемый самолетом, направлены либо на уменьшение токов, заряжающих самолет, либо на увеличение токов разрядки./25/.

Токи на самолет регулируют, подбирая материал покрытий так, чтобы получить наиболее благоприятное значение контактной разности потенциалов. Как быстрота приобретения заряда, так и его знак зависят от свойств вещества поверхности и облака - соотношения в нем количества водяных капель и кристаллов льда, их размеров, температуры. Рекомендуется избегать сред, неблагоприятных для данного покрытия, подбирать покрытия, наиболее подходящие для сред, соответствующих типичным для данной модели высотам. Это не слишком надежная мера, т.к. заряд самолета и контактная разность потенциалов могут резко меняться, если на поверхность попадают, к примеру, брызги грязи./25/.

В /25/ предлагается снабдить самолеты шторками, покрытие которых имеет со средой контактную разность потенциалов, противоположную по знаку той, которую создает материал самолета. Регулируя их площадь, можно повлиять на течение электризации. Если контактная разность потенциалов основного покрытия меняет знак при переходе из водного аэрозоля в ледяной, что, например, имеет место для дюрала, шторки должны быть более сложными, но принцип их действия остается прежним.

Последняя мера, как более универсальная, является более подходящей для ОТС. Избегать же неблагоприятных сред можно не во время полета, а только выбирая время начала подъема так, чтобы над эстакадой не было гроз и потенциально опасной облачности.

На токи разрядки самолета, как обусловленные проводимостью ионизированного воздуха, так и вызванные дополнительными мерами - от проводимости выхлопных струй до электронной эмиссии, влияет скорость самолета. Точнее, то, что он все время выходит из создаваемого им объемного заряда, так что объемный заряд может не учитываться в расчетах.

Для случая ОТС имеет значение то, что оно не имеет выхлопных струй, а уход из объемного заряда связан с относительно небольшой скоростью подъема.

Облачная среда по своим свойствам нестабильна и неоднородна. Поэтому необходимо, чтобы некоторые свойства поверхности ОТС регулировались в системе отрицательной обратной связи с показаниями приборов, определяющих степень опасности поражения молнией.

В /26/ из экспериментов следует, что радиолокации облаков для этого недостаточно. Более чем в половине случаев поражения молниями самолетов в негрозовых облаках радиолокационной засветки не наблюдалось или она не свидетельствовала об опасности. Поэтому /26/ предлагается устанавливать на самолете систему приборов, измеряющих непосредственно электрическое поле, обусловленное объемным зарядом в облаке и зарядом самолета, чтобы избегать областей, в которых напряженность внешнего поля и заряд самолета достигают критических значений.

ОТС не может по ходу движения существенно отклоняться, но можно, применяя упомянутые выше меры, влиять на поверхностную плотность заряда так, чтобы поверхность оставалась практически нейтральной или поле заряда локально компенсировало внешнее поле.

Если есть необходимость, устраняя опасность разряда молнии на поверхность ОТС, сохранить энергию приобретенного заряда, можно совместить с подбором покрытий распределение приобретенного заряда по большей или меньшей емкости.

Допустим, определенные участки поверхности создают со средой контактную разность потенциалов другого знака по отношению к остальной части поверхности. Заряд на них, соответственно, также противоположного знака, и если покрытия изолированы друг от друга, заряды накапливаются независимо.

При подходящем распределении покрытий по поверхности поля зарядов разных знаков могут компенсировать друг друга на заданном расстоянии, аналогично тому, как электростатическое поле заряженной сетки, состоящей из параллельных проволочек, совпадает с полем равномерно заряженной плоскости, начиная с расстояния, в несколько промежутков между проволочками. На этом принципе основано и экранирование от электростатических полей с помощью проводящих сеток. /27, гл. 7/.

Для безопасности в облаке достаточно, чтобы характерное расстояние экранирования не превосходило характерной протяженности распределения объемных зарядов в облаке. Это требование вполне осу-

ществимо.

Кроме того, поверхностный заряд может уменьшать аэродинамическое трение./25/.

Без экспериментальных исследований невозможно заключить, что наиболее целесообразно: увеличивать емкость поверхности, регулировать соотношение материалов покрытий, создавать дополнительный отток заряда с веществом или как-то их сочетать. Кроме того, необходимо уточнить значение критической напряженности электрического поля для такого объекта, как ОТС: протяженного в горизонтальном направлении и быстро поднимающегося.

В /26/ указывается, что заряженный до критического значения самолет не вызывает электрического пробоя в полях более слабых, чем 10^5 В/м, потому что на поддержание разряда не хватает энергии заряда самолета. Но энергия заряда ОТС значительно больше. Не исключена необходимость поддерживать его поверхностную плотность на более низком уровне, чем это требуется для самолета.

Выбор защиты ОТС от поражения молниями должен во многом зависеть от характерной облачности тех широт, где будет установлена эстакада. На экваторе с его бурной, регулярной и кратковременной грозой деятельностью необходимо предотвратить возможность проводирования молний в облаках небольшой протяженности и поражений молниями в грозе. В умеренных широтах большее количество пасмурных дней в году, а, значит, протяженная слоисто-дождевая облачность, следовательно, возможность электризации при большой площади контакта, небольшой скорости и короткое время. Значит, и специфика снижения электризации для каждого случая может отличаться.

ОТС в области грозовой активности.

В /26/ указывается, что в слоисто-дождевых облаках, имеющих внутренние области с предразрядными значениями напряженности электрического поля, самолет обычно находится в условиях опасности разряда около 10 минут, прежде, чем будет поражен молнией. ОТС поднимается сквозь облака со скоростью 20 м/с не более 15 минут. Если критические для самолета 10 минут сохранятся и для ОТС, инициация молний во время подъема, во всяком случае, в слоисто-дождевых облаках, исключена. Но это еще предстоит выяснить экспериментально.

Но независимо от возможности инициирования молний остается опасность поражения молниями в грозе.

Способы, предупреждающие или прекращающие развитие грозовой активности, делятся на две основные категории. В основе одной лежит воздействие непосредственно на электрические свойства облаков, их цель - искусственное разряжение объемных зарядов в облаке до того, как сформируются условия для возникновения разрядов молний.

Другая категория мер - воздействие на микрофизические свойства облаков, которые повлекут за собой прекращение электризации облачных частиц, разделения зарядов в облаке и, следовательно, грозовой деятельности.

Основные способы борьбы с грозой путем влияния на электрические свойства облака - это засев облаков с самолетов металлизированными нитями или иодистым серебром./10,23/.

Способ воздействия на микрофизические свойства облаков использует неустойчивость их структуры.

Существование кучевых и кучево-дождевых облаков, которые могут при соответствующих условиях развиваться в грозовые, поддерживается мощным восходящим потоком. Засев кучево-дождевых облаков мощностью 5 - 6 км грубодисперсными аэрозолями приводил к их разрушению. Смачивание аэрозольных частиц вело к росту капель, крупные капли при падении увлекали за собой воздух, вызывая ослабление восходящих токов, поддерживающих структуру облака./10/.

Нисходящие потоки, приводящие к разрушению облаков, вызывались также с помощью турбовинтовых самолетов./10/.

Отрицательные результаты аналогичных экспериментов со слоисто-дождевыми облаками подтверждают правильность интерпретации, связанной с конвективной структурой облаков./10/.

Как видно, эти способы требуют известной заблаговременности.

Дренирование.

Еще одним способом предупреждения грозовой деятельности является дренирование /23/, которое представляет собой создание условий для оттока заряда из нижней части тучи, разрядка потенциала между тучей и земной поверхностью до того, как сформируются условия для поджига молний.

Практически задача сводится к необходимости создать повышен-

ную проводимость между тучей и землей.

Убедительных экспериментальных результатов пока нет. Введение в тучу заземленного троса, конец которого поднимается на высоту 1000 - 2000 м, не привело к прекращению грозовой активности, молнии продолжали поразать землю на определенном расстоянии от основания троса./23/.

Это связано со следующей особенностью атмосферно-электрических процессов. Воздух и вещество облаков имеют низкую удельную проводимость по сравнению с почвой или металлическими предметами. Заметные электромагнитные эффекты становятся возможными потому, что большие объемы атмосферных образований создают большую общую проводимость. Но в результате контакта проводников с существенно разной удельной проводимостью, например, облачной среды и металлической проволоки, потенциалы выравниваются достаточно долго. А т.к. объемный заряд в облаке распределен на отдельных капельках, взвешенных в воздухе, то он может переноситься на твердый проводник только при смачивании, а также проводимостью воздуха. Т.о., закономерно, что отводится заряд только незначительной части облака.

Для прекращения грозовой деятельности предполагается необходимым создать повышенную проводимость по всему объему между тучей и землей. Это гораздо более масштабное и сложное мероприятие./ В /23/ предлагается ионизировать воздух с помощью радиоактивных веществ, но из экологических соображений это вряд ли приемлемо. В /10/ указывается возможность ионизации больших масс воздуха с целью дренирования грозовых туч с помощью излучения мощных лазеров.

Однако, при описании экспериментов с введением в облако заземленного троса упоминалось, что на определенном расстоянии от него разрядов молнии на землю не происходило. Возможность использования заземленного троса для того, чтобы обеспечить безопасность отдельного объекта в грозовом облаке, например, ракеты, указывается в /10/. Это подтверждается ссылкой на работы Ньюмена, в которых описываются эксперименты с введением в облако длинной проволоки с помощью ракеты.

Интерпретация значения скорости введения проводника в облако не вполне понятна. В /10/: положительный результат может быть достигнут, если скорость достаточно велика, так что вокруг проводника не успевает образовываться экранирующий объемный заряд. Но в чем заключается положительный результат, не указано, а цель

экспериментов Ньюмена - искусственное вызывание молний и изучение их длинноволнового излучения, а не локальное дренирование облака. В /24/ обращается внимание на то, что достаточно высокая скорость, при которой не успевает возникнуть возмущение объемного заряда в облаке - условие успешного инициирования молнии.

Скорее всего, для безопасности объекта внутри грозового облака необходимо именно взаимодействие проводника с объемным зарядом. Посмотрим, как это можно применить для того, чтобы обеспечить безопасность ОТС.

Перенос части объемного заряда облака на самолет создает только 0,01% приобретаемого им заряда. Для ОТС, вероятно, также будут преобладать явления, связанные с электризацией в результате контактной разности потенциалов, но из-за большой площади поверхности, как контактирующей с облаком, так и общей, взаимодействие с объемным зарядом облака может оказать более существенное влияние.

Скорость ОТС достаточно велика, на высоте более 1 км она уже сравнима со скоростью самолета. Но из-за горизонтального расположения ОТС горизонтальную составляющую скорости можно не учитывать, т.к. без вертикальной составляющей оно не уходило бы от сопутствующего объемного заряда и его поверхность соприкасалась бы с той же частью вещества облака. Так что скорость ОТС относительно объемного заряда - это скорость подъема - в нашем случае 20 м/с, но, очевидно, при необходимости может быть и другой.

Когда в облаке часть объемного заряда переносится на поверхность ОТС, это меняет, хоть и незначительно, характер распределения объемного заряда около него. В целом процесс электризации оказывает более существенное влияние. Заряд, равный по величине и противоположный по знаку приобретенному ОТС, распределяется в среде облака в зависимости от скорости подъема и окружающего распределения зарядов.

Таким образом, не исключена возможность того, что существует скорость подъема, приемлемая и из других соображений, при которой ОТС будет достаточно медленно уходить из объемного заряда, чтобы он успевал возобновляться. Для безопасности в грозе важно совпадение знаков зарядов той части облака, где может начаться разряд, и экранирующего объемного заряда.

Для того, чтобы выбрать оптимальную скорость подъема и материал покрытия, потребуются эксперименты, разработанные на основе результатов исследований электризации самолетов и первых опытов дренирования с помощью металлических проводников.

Замыкание на оболочку ОТС как аналог заземления.

Так как заряд стремится распределиться по внешней поверхности проводника, замыкание изнутри на оболочку ОТС вполне заменит заземление с целью снятия статического электричества.

Если замкнуть на проводящую поверхность ОТС какой-нибудь предмет с внешней стороны, часть заряда, приобретенного в облаках может перейти на него. Сравним, не превышает ли он заряд, аналогичным образом приобретаемый той же емкостью при заземлении.

Выше мы получили, что емкость проводящей оболочки ОТС составляет около 0,32 мкФ при поперечнике 1 м и 1 мкФ при поперечнике 10 м. Это большие емкости по сравнению с типичными значениями для лабораторных установок, но они намного меньше емкости Земли, величина которой - около 700 мкФ.

Для примера возьмем емкость заземляемого объекта, равную 10 пФ, это достаточное значение для корпуса лабораторного демонстрационного устройства. Это много меньше, чем емкость ОТС и, тем более, Земли, поэтому приобретаемый во время прикосновения заряд с достаточной точностью получится из пропорции.

Если заряд всей Земли 10^5 Кл, наша емкость при заземлении приобретет $1,4 \times 10^{-3}$ Кл, Если ОТС приобретет, например, 100 Кл, то на 10 пФ перетекает 1×10^{-3} Кл с 1 мкФ или 3×10^{-3} Кл с 0,316 мкФ, т.е., приблизительно как и при заземлении.

Так, соединение с поверхностным слоем ОТС вполне может быть использовано для снятия статического заряда и экранирования электрических полей.

Рассмотрим, может ли для ОТС на подъеме существовать аналог заземленного устройства, отводящего разряды молний.

Идеальным наземным средством защиты от молний является сплошная броня из металлических листов, заземленная и не имеющая контакта с защищаемым предметом. Но из-за высокой стоимости и небольшой вероятности попадания молнии такие средства защиты обычно не применяются. /23/.

Рассмотрим, что необходимо принять во внимание, чтобы, используя большую, в отличие от самолета, емкость ОТС, придать его поверхности свойства броневой защиты от молний.

Величина импульсного тока, действие которого приводит к калению, плавлению или испарению металла, можно получить из расчетной формулы /23/:

$$I = k \frac{q}{\sqrt{t}},$$

где q - площадь поперечного сечения проводника в мм^2 , t - промежуток времени от начала импульса до момента спада напряжения волны до 50% амплитудного значения в микросекундах, k - эмпирический коэффициент, в /23/ приводится таблица его значений для случаев каления, плавления и испарения нескольких металлов - это числа порядка сотен тысяч.

Для проволоки, площадь поперечного сечения которой превышает 1 мм^2 , расчетные значения критического импульсного тока оказываются завышенными, т.к. начинает сказываться скин-эффект, ток проходит только по поверхностному слою, и фактическая проводимость определяется только частью поперечного сечения. Расчетная формула для толщины скин-слоя имеет следующий вид /23/:

$$\delta \approx 5300 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}.$$

Здесь ρ - удельное сопротивление вещества в Ом см, μ - магнитная проницаемость вещества, f - частота волн тока в МГц. Для ферромагнетиков, как видно из формулы, толщина скин-слоя значительно меньше.

С учетом этого подстановка в формулу тока молнии, равного $2 \times 10^5 \text{ А}$, и характерного времени импульса, взятого из примера расчета, приводимого в /23/, показывает, что для цилиндра с большим поперечником, какой представляет собой вакуумированная оболочка, коэффициент k на 2 порядка меньше приводимых в /23/, и разряд молнии должен быть заведомо безопасен.

Однако эмпирическая формула, полученная для сравнительно тонких цилиндров, не учитывает всех эффектов, происходящих при разряде молнии на полый цилиндр диаметром около 1м. Наблюдаемые повреждения металлических предметов: пережигание одной или нескольких жил в многожильном тросе, выплавление отверстий в тонких листах металла и выжигание углублений в более толстых образцах - свидетельствуют о том, что мощность разряда реализуется локально, проводимость и теплопроводность металла оказываются недостаточными для быстрого отвода тока и тепла от пораженного места.

Тепловая энергия, выделяемая при разряде на металл, прямо пропорциональна падению напряжения в месте перехода из воздуха на проводник. Согласно данным о дуговом процессе оно составляет около 6÷8 В. Снижение напряжения искра - металл способствует уменьшению его поражения. /23/.

Вакуумированная оболочка, по-видимому, может служить броней, защищающей магнитный подвес от поражения молнией прежде всего благодаря толщине, которая позволяет удерживать вакуум. Но хотя в результате удара молнии не должно произойти проплавления отверстия в оболочке, которое привело бы к нарушению вакуума, необходимо предусмотреть возможный ущерб прочности, который может нанести выплавленное в результате термического действия молнии углубление. Незначительный для наземного устройства таких же размеров, он может быть опасным для ОТС из-за испытываемых оболочкой механических напряжений во время подъема.

Пассажиры отсеки, которые подвешиваются к вакуумированной оболочке, а в верхних слоях атмосферы отделяются и функционируют как автономные летательные аппараты, во время подъема, как выступающие конструкции, приобретают повышенную поверхностную плотность заряда и, следовательно, вероятность поражения их молнией увеличится. Защита может быть аналогичной наземным средствам: отводящие разряд стержни или тросы, при необходимости - сплошная оболочка. Все это с "заземлением" на корпус вакуумированной оболочки.

В стационарном варианте оболочка также должна иметь большую проводимость и не иметь электрического контакта с внутренними предметами в грозовой зоне. Отдельно требуют защиты, например, иллюминаторы, т.к. стекла, как и другие твердые диэлектрики могут в результате пробоя растрескаться на мелкие осколки./23/. Для этого на время прохождения сквозь область грозовой деятельности можно закрыть их проводящими ставнями.

Отводящие разряды молний устройства понадобятся далеко не на всем протяжении ОТС, т.к. при скорости подъема 20 м/с корпус повернется не более, чем на 2 градуса.

Замечания о значении грозовой активности.

Возможно, безопасность подъема ОТС сквозь облачный слой требует мер прекращения грозовой деятельности. Тогда, в зависимости от способа воздействия разряды молний прекратятся либо только пока ОТС пройдет облачный слой, либо от начала подъема ОТС до конца грозы. Так или иначе, это небольшой отрезок времени, скорее всего, здесь нет необходимости учитывать экологические соображения.

Но в общем случае нельзя сказать с определенностью какая мера произвольного вмешательства в естественный ход грозовой деятельности должна считаться допустимой, а какая - нет, пока не выяснено значение того, что заряд Земли поддерживается на уровне 10^5 Кл.

Токи разрядки при ясной погоде, а, значит, и вызывающая их разность потенциалов между землей и ионосферой испытывают глобальные суточные вариации с максимумом в 19⁰⁰ по Гринвичу./27/. Это связано с асимметричным распределением суши и океанов, и, в соответствии с этим, грозовой активности на Земле.

Кроме того, грозовая активность коррелирует с изменениями солнечной активности и межпланетного магнитного поля, как и многие процессы в биосфере./7/. Но меньше всего известно о значении именно наблюдаемого заряда Земли и потенциала атмосферы.

Изменение грозовой активности, связанное с влиянием межпланетного магнитного поля, могло бы служить основой для сравнения, малое по сравнению с ним должно считаться допустимым. Но корреляция наблюдается на уровне числа грозовых дней в году, изменение продолжительности гроз на десятки минут не учитывается. Так что такой подход может привести только к ограничению применения мер, приводящих к разрушению облаков и прекращающих не только разряды молний, но и осадки.

Влияние самих влажности и атмосферного давления, определенные соотношения которых вызывают развитие грозовой деятельности, а также режима осадков более очевидно. Действие разрядов молний также известно. С одной стороны от прямого поражения молниями на всей Земле в год погибает 10 000 человек, а ущерб от лесных пожаров, вызванных молниями, составляет 60 - 80 млн. долларов/ потери учитывались только в кубометрах древесины./28/.

С другой стороны, при грозах происходит очистка атмосферы. Содержание SO_2 после грозы снижается в 1,5 раза, а $N_2 O_5$ - в 1,4 раза. Но осаждение химических веществ не столько связано с молниями, сколько с ливнями. Электропроводность воздуха, которая свидетельствует о его чистоте, повышается. Через час после грозы ее значение в 1,35 - 1,44 раза больше, чем за 2 часа до грозы./29/.

С учетом этого предпочтительнее меры защиты, не прекращающие осадки.

Заключение.

Предварительно оценивая результаты взаимодействия ОТС и атмосферного электричества, мы пользовались результатами экспериментов с самолетами. Но их применимость в данном случае неочевидна и требует экспериментальной проверки.

Выше отмечалось, что при прохождении сквозь облака, в которых могут быть области с предразрядным значением напряженности электрического поля, самолетам, заряженным до опасного предела, достаточно за 10 минут, которые обычно проходят до разряда /26/ успеть выйти из предразрядной области. Если ОТС достаточно быстро пройдет облачный слой, разряд молнии ему не угрожает. Но следует выяснить, остается ли для такого протяженного объекта, как ОТС, прежним значение предразрядной напряженности поля в облаке, опасного уровня поверхностной плотности заряда и критического отрезка времени от момента достижения опасных параметров до того, как произойдет разряд молнии. Моделировать отрезок ОТС можно цепочкой аэростатов необходимой длины.

Если окажется, что быстро пройти сквозь облака недостаточно или на скорость подъема накладываются какие-то другие соображения, следует экспериментально проверить применимость для соответствующих скоростей мер снижения электризации, разработанных для самолетов.

При прохождении грозы, по-видимому, наиболее применимо "заземление" молниеотводов с пассажирских отсеков на проводящую оболочку, которая должна выдержать соответствующий импульсный ток. Для достижения этого потребуются провести эксперименты, исследующие прочность, прежде всего - на разрыв, металлических образцов после и во время прохождения сильных импульсных токов, имитирующих разряды молний.

Л и т е р а т у р а

1. А.Э.Юницкий. Пересадочная, космическая, кольцевая. Изобретатель и рационализатор, №4, 1982, с.28-29.
 2. А.Э.Юницкий. В космос - без ракеты. Техника и наука, №4,1987, с. 40-43.
 3. Дж.А.Чалмерс. Атмосферное электричество. Л., "Гидрометеиздат", 1974.
 4. Г.Ришбет, О.К.Гарриот. Введение в физику ионосферы. Л., "Гидрометеиздат", 1975.
 5. Л.В.Тарасов. Физика в природе. М., "Просвещение", 1988.
 6. Э.А.Лаутер. Атмосфера и ее роль в защите жизни на Земле. В ежегоднике "Наука и человечество", 1978, М., "Знание", 1978.
 7. А.А.Дмитриев. Солнечная активность, погода и климат. М., "Знание", 1987.
 8. И.Блутген. География климатов. Т.1. М., "Прогресс", 1972.
 9. Х.Редерер. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем. М., "Мир", 1972.
 10. В.М.Мучник. Физика грозы. Л., "Гидрометеиздат", 1974.
 11. Ф.Чен. Введение в физику плазмы. М., "Мир", 1987.
 12. Г.Альвен, К.-Г.Фельтхаммар. Космическая электродинамика. М., "Мир", 1967.
 13. Ю.Г.Мизун. Волны в космосе. М., "Наука", 1988.
 14. Л.Н.Яременко. Исследование экваториального струйного электротока /по данным МГГ/. Автореферат дис. ... канд. физ.-мат.наук. Киев, 1978.
 15. Я.Л.Альперт. Волны и искусственные тела в приземной плазме. М., "Наука", 1974.
 16. *Few A.A., Weinheimer A.J. Factor of 2 error in balloon-borne atmospheric conduction current measurements. J. Geophys. Res., 1986, D91, N10, 10937 - 10948.*
- Ошибка в 2 раза в зондовых измерениях тока проводимости атмосферы. /РЖ"Геофизика", 1987, 5Б187/.
17. В.А.Троицкая. Служба космической погоды. В ежегоднике "Наука и человечество"-1973. М., "Знание", 1973.

18. С.В.Зверева. Задачник по общей метеорологии. Атмосферная оптика. Электричество. Акустика. Л., "Гидрометеиздат", 1980.
19. В.П.Колоколов. Грозы идут по планете. Л., "Гидрометеиздат", 1965.
20. И.С.Стекольников. Молния и защита от ее действия. М., "Знание", 1958.
21. Т.В.Лободин. Распределение суммарного числа разрядов на земном шаре. Труды ГГО, вып. 442, с.44-46.
22. Океан - атмосфера. Энциклопедия. Пер. с англ. Л., 1983.
23. И.С.Стекольников. Физика молнии и грозозащита. М.-Л., Изд. АН СССР, 1943.
24. М.Ньюмен. Искусственное вызывание молнии для изучения процессов разряда и распространения сверхдлинных волн. "Проблемы атмосферного электричества". Труды третьей международной конференции по электричеству атмосферы и космического пространства. Гидрометеорологическое издательство. Л., 1969.
25. И.М.Имянитов. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л., "Гидрометеиздат", 1970.
26. Е.В.Чубарина, В.В.Михайловская. Определение электрической опасности облака для самолета. Труды ГГО, 1988, вып. 514, с.40-47.
27. Р.Фейнман, Р.Лейтон, М.Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 5. Гл.9. М., "Мир", 1977.
28. Т.В.Лободин. К вопросу об ущербе, наносимом грозами. Труды ГГО, вып. 498, с.70-71.
29. Т.В. Лободин. Очистка атмосферы при грозах. Труды ГГО, вып. 498, с.69-70.