

**К.С. Мозгов**, канд. физ.-мат. наук; **Н.С. Носикова**; **С.И. Ренский**;  
**В.В. Сурков**, докт. физ.-мат. наук (АО «НПК «СПП», г. Москва);  
**С.И. Климов**, докт. физ.-мат. наук; **В.А. Пилипенко**, докт. физ.-мат. наук  
(ИКИ РАН, г. Москва);  
**В.А. Шувалов**, канд. техн. наук; **А.А. Яковлев**, канд. техн. наук  
(ФГУП ЦНИИмаш, г. Королёв)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО

Рассматриваются различные аспекты воздействия гроз и влияния техногенной активности на околоземное космическое пространство (ОКП). Особое внимание уделяется низкочастотному диапазону электромагнитных возмущений – от долей до десятков герц, поскольку в этом диапазоне в результате грозовых разрядов происходит накопление электромагнитной энергии в альвеновском резонаторе и магнитозвуковом волноводе в верхних слоях ионосферы. Анализируются перспективы изучения при помощи спутников низкочастотных электромагнитных полей, генерируемых как обычными молниями в тропосфере, так и стратосферными и мезосферными электрическими разрядами типа спрайт и голубой джет (ГД), возникающими между облаком и нижними слоями ионосферы. Оцениваются возможности спутниковых наблюдений шумановских резонансов и собственных мод ионосферного альвеновского резонатора (ИАР). Определяются уровни чувствительности приборов, необходимых для регистрации этих эффектов с помощью спутников.

**Ключевые слова:** низкоорбитальный спутник, глобальная грозовая активность, шумановские резонансы, ионосферный альвеновский резонатор, спрайт, голубой джет.

**K.S. Mozgov, N.S. Nosikova, S.I. Rensky, V.V. Surkov, S.I. Klimov, V.A. Pilipenko, V.A. Shuvalov, A.A. Yakovlev. The Effect of Lightning Activity on the Near-Earth Space.** In this paper the influence of lightning and tehnogenic activity on the near-earth space is discussed. A special attention is paid to ultra low frequency (ULF) range of electromagnetic perturbations; that is, from a fraction Hertz to tens of Hertz, since the ULF electromagnetic energy caused by lightning discharges is accumulated in the Alfvén and magnetosonic waveguides in the upper atmosphere. The prospects for studying of ULF electromagnetic fields generated by lightning in the troposphere as well as by the stratospheric and mesospheric electric discharges such as sprites and blue jets are analyzed. A possibility for both the Alfvén and Schumann resonances detection by satellites is discussed together with estimation of appropriate devices sensitivity.

**Key words:** low orbit satellite, global lightning activity, Schumann resonances, ionospheric Alfvén resonances, sprite, blue jet.

**П**остоянное усовершенствование методов геофизических наблюдений приводит к выводу: многие наиболее мощные природные процессы концентрируются в малых пространственных и временных объ-

ёмах. В качестве примера такого кратковременного процесса с выделением громадной энергии можно отметить магнитосферные суббури в ОКП. Хотя окончательно механизм этого явления остаётся невыясненным, несомненно то, что ключевую роль в нём играет ускорение авроральных электронов продольными электрическими полями, в результате чего создаётся яркая динамическая картина полярных сияний. Эти интенсивные поля образуются, по-видимому, в мелкомасштабных электромагнитных структурах – кинетических альвеновских волнах.

Однако не только полярные сияния обязаны этим полям. Высокая чувствительность околоземной среды к электромагнитной активности атмосферы обуславливает цепочку явлений, приводящих к изменению геофизической обстановки в ОКП. Электрические поля грозových разрядов приводят к генерации токов в ионосфере и магнитосфере, в результате чего изменяется топология электрических и магнитных полей, образуются неоднородности в ионосфере, накапливается волновая энергия в геофизических средах. Таким образом, возникают внутренние источники изменения геофизической обстановки в ОКП, следствием чего становятся дополнительные электромагнитные и радиационные воздействия внешней среды на процесс функционирования технических объектов.

В настоящее время недостаточно количественной информации о влиянии грозовой активности на ОКП. Возникает необходимость создания измерительных инструментов для получения данных об электромагнитных воздействиях на геофизические среды. Для решения этой задачи целесообразно использовать космические средства с соответствующей аппаратурой. Представим результаты исследования степени влияния грозовой активности на ОКП, определения диапазонов изменения геофизических процессов и выбора необходимой измерительной аппаратуры.

#### **АТМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**

Грозы в атмосфере являются одним из наиболее мощных возмущений в околоземной геофизической среде. Несмотря на локальность и короткую длительность грозowego разряда, планетарная грозовая активность оказывается одним из существенных факторов, обеспечивающих связь между атмосферой и ионосферой/магнитосферой. Молнии являются мощным природным источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, – от долей герц до десятков мегагерц, покрывая диапазон от ультранизкочастотных (УНЧ) (менее  $3 \text{ Гц}$ ), до высокочастотных (ВЧ) ( $3 - 30 \text{ МГц}$ ) излучений. Максимум спектральной плотности приходится на очень низкочастотный (ОНЧ) диапазон ( $3 - 30 \text{ кГц}$ ). Тем не менее, значительная спектральная мощность сосредоточена в низкочастотном УНЧ – КНЧ-диапазоне (до  $\approx 50 \text{ Гц}$ ). Этот диапазон интересен тем, что в нём лежат собственные частоты нескольких природных резонаторов и волноводов, обуславливающих резонансные эффекты взаимодействия между геофизическими оболочками. Высокопроводящие земная кора и нижние слои ионосферы образуют гигантский сферический резонатор для электромагнитных колебаний – шумановский резонатор (ШР) с дискретными собственными частотами от  $7,8 \text{ Гц}$  (основная мода) до нескольких десятков герц (гармоники). Этот резонатор

постоянно подпитывается энергией мировой грозовой активности, главные центры которой находятся в тропических широтах в Южной Америке, Африке и Юго-Восточной Азии. Резко неоднородная по высоте структура ионосферной плазмы приводит к образованию ИАР для альвеновских волн, распространяющихся вдоль линий индукции магнитного поля Земли. Нижней границей ИАР является проводящий гиротропный  $E$ -слой ионосферы (100 – 130 км), а верхняя граница расположена на высоте около 1000 км, где происходит частичное отражение альвеновских волн при градиенте плотности ионосферной плазмы [1], [2]. Резонансные частоты ИАР лежат в интервале от долей герц до частоты основного шумановского резонанса и выше. Возбуждение ИАР может быть связано как с глобальной грозовой активностью, так и с региональными грозами, и даже с отдельными интенсивными разрядами молний. Пока не существует единого мнения о главных механизмах возбуждения ИАР, но одной из наиболее вероятных причин представляются глобальная и региональная грозовая активности.

Часть энергии электромагнитного излучения молний может проникать в ионосферу и магнитосферу Земли, в том числе энергия глобальных электромагнитных резонаторов в частотном диапазоне 0,5 – 50 Гц, таких как ШР или ИАР. В результате накопления этой энергии могут изменяться не только параметры ионосферной плазмы, но и динамика частиц, образующих кольцевой ток и радиационные пояса Земли. Таким образом, электромагнитные возмущения могут приводить к существенному переносу энергии между геофизическими средами, следовательно, грозовая активность может быть важным фактором, влияющим на состояние ОКП.

#### **ЛОКАЛЬНОЕ ВЫСЫПАНИЕ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ИНДУЦИРОВАННОЕ РАЗРЯДОМ МОЛНИИ**

Спектральная плотность энергии электромагнитного излучения молний сосредоточена в основном в килогерцевом интервале частот. Именно в этом частотном диапазоне происходит излучение свистящих атмосфериков («свистов», или *whistler*), проникающих в магнитосферу Земли. Несмотря на малую энергию ОНЧ-импульса отдельного молниевое разряда, этот импульс может оказывать заметное воздействие на ионосферную плазму. Указанный эффект является хорошим примером триггерных явлений в геофизике, во время которых в результате слабого внешнего воздействия высвобождается накопленная в системе энергия, что и приводит к значительно более мощному возмущению системы.

Всплеск ОНЧ-«свистов», распространяющийся в магнитосфере, резонансно взаимодействует с группой захваченных в геомагнитном поле энергичных электронов с энергиями порядка нескольких десятков килоэлектронвольт и вызывает изменение их питч-угла – угла между векторами скорости и локального магнитного поля – без изменения энергии электронов. Эти малые изменения оказываются достаточными для того, чтобы вызвать высыпание электронов в ионосферу. Механизм воздействия на ионосферу ОНЧ-«свиста», вызванного разрядом молнии, показан на рис. 1. Благодаря этому механизму ОНЧ-всплеск может «накачать» в ионосферу энергию, на 4 порядка большую, чем энергия самого всплеска [3]. Дискретные потоки высыпавшихся электронов, стимулированные молниями, относительно неве-

лики: они в  $\sim 10^3 - 10^4$  раз ниже, чем типичные потоки авроральных электронов, создающих полярные сияния. Поэтому оптические или рентгеновские излучения, обусловленные такими потоками, крайне трудно зарегистрировать, поскольку создаваемая вторичная ионизация составит лишь малую долю фоновой ионизации *E*-слоя ионосферы, которую будет невозможно зарегистрировать радарными, ионозондами или риометрами. Однако в *D*-слое

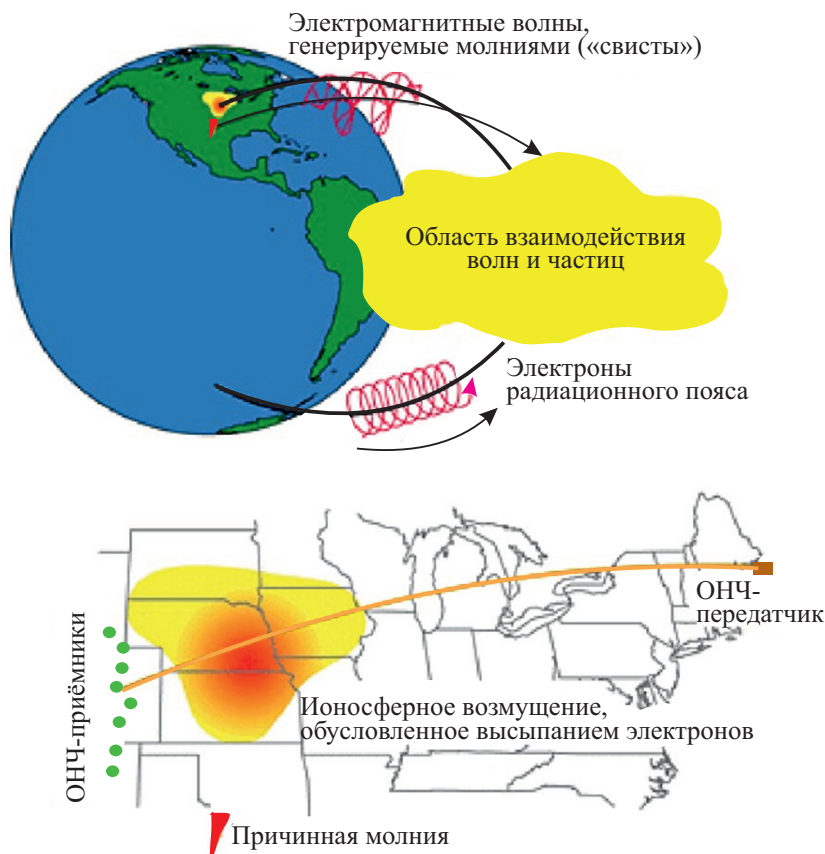


Рис. 1. Механизм воздействия на ионосферу ОНЧ-«свиста», обусловленного разрядом молнии

фоновая ионизация невелика, особенно в ночные часы ( $\sim 1 - 10 \text{ см}^{-3}$ ), поэтому малая дополнительная ионизация за счёт индуцированного высыпания электронов с энергией более  $100 \text{ кэВ}$  оказывается уже заметной. Наиболее подходящим методом для дистанционного обнаружения локализованных высыпаний оказалось просвечивание волновода Земля – ионосфера сигналами сверхдлинноволновых (СДВ) ( $\sim 10 \text{ кГц}$ ) радиопередатчиков: амплитуда и фаза принимаемых СДВ-сигналов в пределах первой зоны Френеля весьма чувствительны к появлению неоднородностей ионосферной плазмы вдоль радиотрассы («Trimpi-эффект») [3].

Анализ данных, полученных спутником *SAMPEx* и сетью наземных станций, позволил предположить, что неволноводное распространение косых «свистов» в магнитосфере, излучаемых разрядом молнии, является важным механизмом поглощения энергии применительно к энергичным

электронам радиационных поясов Земли [4]. Связь между молнией и индуцированным ею «свистом» подтвердили результаты экспериментов, в ходе которых наземная измерительная сеть *EUCLID* фиксировала молнию, а спутники *DEMETER* и *MAGION-5* детектировали «свист», порождаемый этой молнией [5]. При неволноводном распространении внутри плазмосферы эта волна может достигнуть области, где велики градиенты геомагнитного поля и плотности магнитосферной плазмы (высота порядка  $10^3$  км), а затем отражаться в точках, где локальная частота нижнего гибридного резонанса совпадает с частотой «свиста». При многократном отражении «свиста» его энергия поглощается при резонансном взаимодействии с надтепловыми электронами (энергия  $0,1 - 1$  кэВ). Благодаря резонансу волна – частица происходит уменьшение питч-угла электронов, который может стать меньше критического, что приведёт к высыпанию электронов в атмосферу.

Высказывалось даже предположение, что грозовая активность может быть одним из механизмов образования зазора между внутренним и внешним радиационными поясами Земли. Кажется невероятным, что процессы в приземной атмосфере могут повлиять на область космического пространства, удалённую от Земли более чем на 10000 км. Однако результаты сопоставления глобальных распределений грозовой активности, зарегистрированной спутником *MicroLab-1*, с данными о регистрации радиоволн на спутнике *IMAGE* показали хорошее соответствие между ними. Поскольку ОНЧ-«свисты» воздействуют на захваченные частицы и заставляют их высыпаться в атмосферу, постоянное радиоизлучение молний действительно может способствовать формированию зазора между радиационными поясами.

Существует возможность воздействия на радиацию в околоземном пространстве и искусственным путём. Радиоволны в частотном диапазоне  $1 - 10$  кГц, необходимые для резонансного взаимодействия с энергичными электронами, могут генерироваться и наземными передатчиками. Для эффективного излучения радиоволн с такими частотами необходимы антенны размером, сопоставимым с длиной радиоволны, т. е.  $10 - 100$  км. Такие мощные ОНЧ-передатчики с громадными антеннами постоянно работают по всему миру для обеспечения связи с подводными лодками. Излучение этих передатчиков проникает сквозь ионосферу и вызывает резонансное рассеяние электронов в конусе потерь. Одним из наиболее мощных ( $1$  МВт) передатчиков является *Naval Communication Station (NWC)* в западной Австралии, работающий на частоте  $19,8$  кГц. Убедительные доказательства высыпания магнитосферных электронов, обусловленного излучением *NWC*, были получены по данным низкоорбитального спутника *DEMETER* [6]. Суммарное излучение таких ОНЧ-передатчиков также рассматривается как возможный механизм модификации радиационных поясов Земли. Таким образом, путём целенаправленного воздействия на околоземную среду можно ликвидировать искусственные радиационные пояса, возникшие при неконтролируемых высотных ядерных взрывах, подобных взрыву *Starfish* в 1962 г.

## **УНЧ-ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ В ИОНОСФЕРЕ**

Молниевый разряд является также мощным излучателем электромагнитных возмущений в УНЧ-диапазоне ( $0,1 - 5$  Гц) в верхних слоях ионо-

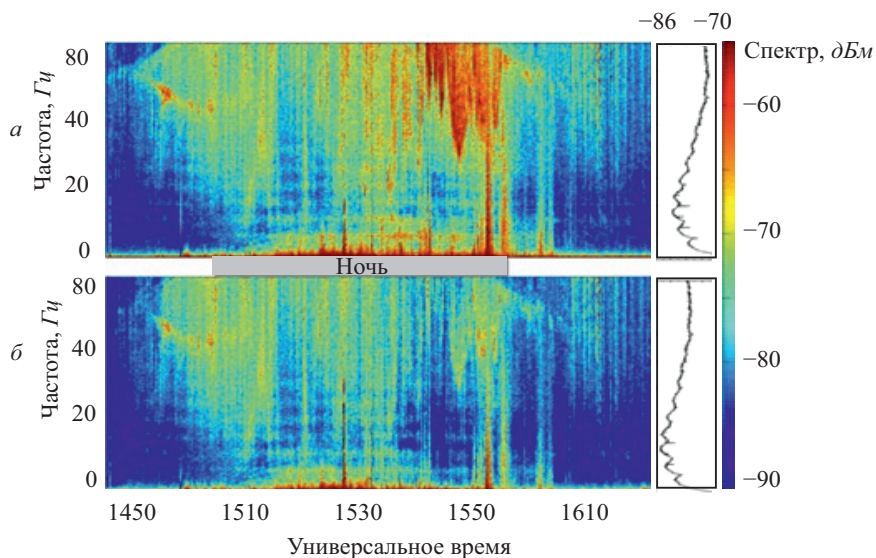
сферы (диапазон  $Pc1-2$  геомагнитных пульсаций). Геомагнитные пульсации  $Pc1-2$  оказывают воздействие, как на электроны радиационных поясов, так и на энергичные ионы кольцевого тока, вызывая диффузию частиц по питч-углам, и, в конечном счёте, – высыпание в атмосферу. В УНЧ-диапазоне лежат резонансные частоты ИАР, который может дополнительно накапливать энергию  $Pc1$  возмущений [2]. Следовательно, можно ожидать появления стимулированных этими излучениями протонных высыпаний в ионосферу над областями грозовых разрядов. Действительно, ионно-циклотронные волны с частотами  $\sim 1$  Гц могут обеспечивать резонансное рассеяние энергичных протонов с энергиями порядка нескольких десятков килоэлектрон-вольт в конусе потерь. Именно такой механизм приводит к появлению пятен протонных полярных сияний на субавроральных широтах.

Принципиальным вопросом в рамках рассматриваемой проблемы является степень проникания УНЧ-полей, генерируемых атмосферными разрядами, в верхние слои ионосферы. Этот вопрос остаётся крайне противоречивым. Некоторые расчёты позволяют предположить очень малую величину УНЧ-возмущений в верхних слоях ионосферы над грозовыми центрами. Однако в результате отдельных спутниковых наблюдений обнаружены весьма значительные возмущения над ураганами – до  $1 - 10$  мВ/м [7]. Для решения вопроса о возможности воздействия УНЧ-излучения грозовых центров на захваченные магнитосферные протоны требуются более совершенные численные модели с реалистичным ионосферным профилем и специализированный анализ спутниковых данных.

#### **НАБЛЮДЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЗОНАНСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВ**

Низкочастотный электромагнитный шум, обусловленный глобальной грозовой активностью, является основным источником энергии ШР, которые возникают в полости Земля – ионосфера в диапазоне частот от 7,8 до 50 Гц. Шумановский резонатор можно наблюдать в любое время в любой точке земного шара, где низок уровень промышленных помех. Традиционно считается, что энергия ШР заключена в сферической полости между Землёй и отражающей границей высокопроводящих нижних слоёв ионосферы. На основании этих представлений обычно рассчитывались частоты и добротности ШР. Однако в результате измерений электрического ионосферного поля с использованием низкоорбитального (400 – 850 км) спутника *C/NOFS*, орбита которого проходила над приэкваториальными широтами (наклонение орбиты  $13^\circ$ ), на ночных спектрограммах (рис. 2) были обнаружены полосы излучения как на основной частоте шумановского резонанса, так и на частотах последующих 5 – 6 гармоник [8]. В УНЧ-диапазоне чувствительность измерений посредством электрической антенны составляла  $10$  нВ/(м·Гц<sup>1/2</sup>), а бортовым магнитометром –  $0,1$  нТл. Измеренная спутником *C/NOFS* на высоте  $\sim 550$  км спектральная амплитуда электрического поля применительно к первым гармоникам шумановского резонанса составила  $\sim 0,1 - 0,3$  мкВ/(м·Гц<sup>1/2</sup>). Заметим, что это значение на 3 – 4 порядка меньше величины вертикальной составляющей электрического поля шумановского резонанса на Земле.

Возможность проникания энергии ШР из атмосферы в нижние слои ионосферы изучалась теоретически. Проведены расчёты применительно к низкоширотной ионосфере в рамках слоистой модели среды [9]. Измеренная посредством спутника *C/NOFS* спектральная амплитуда электрического поля, соответствующая первым гармоникам шумановского резонанса, хоро-



**Рис. 2. Полосы излучения при основной частоте шумановского резонанса и при частотах последующих 5 – 6 гармоник:**

*а, б* – вертикальная и горизонтальная компоненты электрического поля соответственно

шо совпадала с теоретической оценкой, полученной при тех же условиях. Предсказанная применительно к альвеновской волне спектральная амплитуда магнитной компоненты шумановского резонанса в ионосфере  $\sim 0,3 \text{ нТл/Гц}^{1/2}$  оказывается ниже чувствительности магнитометра на борту *C/NOFS*. По-видимому, из-за недостаточной чувствительности бортовых магнитометров магнитную компоненту ШР не удалось обнаружить при использовании низкоорбитальных спутников *CHAMP* и *SWARM*. Однако возможность УНЧ – КНЧ-отклика в ионосфере на особо ощутимые всплески интенсивности ШР (так называемые *Q-bursts*) не исследовалась.

Важный канал связи атмосферных и ионосферно-магнитосферных процессов – воздействие молний на ИАР и магнитогидродинамический ионосферный волновод. Многополосная резонансная структура спектра электромагнитных шумов, обусловленная ИАР, наблюдается на наземных индукционных магнитометрах почти каждую ночь в геомагнитно-спокойное время. В то же время спутниковые наблюдения многополосных спектральных структур, соответствующих ИАР, крайне малы [10].

Теоретический анализ показывает, что в отличие от наземных измерений спектров ИАР спутниковые наблюдения на ионосферных высотах позволяют выявить резонансную структуру, которой должны обладать все поперечные компоненты электромагнитных возмущений [11]. При возбуждении ИАР отдельной молнией возбуждаемая ею альвеновская волна в ионосфере имеет, по оценкам, поперечный размер около 500 км. Перманентное возбуждение

ИАР в результате глобальной стохастической молниевой активности более вероятно на приэкваториальных широтах, где сосредоточены главные мировые грозовые центры. Предсказываемая амплитуда спектральной плотности энергии ИАР при частоте основной моды составляет  $0,1 - 0,2 \text{ мкВ}/(\text{м}\cdot\text{Гц}^{1/2})$ . Данные о наблюдении резонансных спектров ИАР спутником *C/NOFS* [12] согласуются с теоретическими оценками.

Однако имеется ряд расхождений, которые касаются, прежде всего, того, что спектры, похожие на ИАР, наблюдались только при прохождении спутником области терминатора. Причём в части орбиты, где происходило снижение спутника, динамическая картина спектрограмм показывала увеличение всех резонансных частот ИАР со временем, а при подъёме спутника эта тенденция менялась на противоположную. Подобная динамическая картина спектрограмм может быть обусловлена невозбуждением собственных мод ИАР, а интерференцией альвеновских импульсов, отражающихся от верхней кромки ИАР и *E*-слоя ионосферы [13]. Таким образом, вопрос об экспериментальном подтверждении существования резонансных спектров ИАР на ионосферных высотах остаётся открытым.

Часть энергии, выделяющейся в результате грозовой активности, может передаваться в верхние слои ионосферы в виде УНЧ-альвеновских и магнитозвуковых волн. В результате молниевых разрядов возбуждается взаимосвязанная система волн, охватывающая как ИАР, так и ионосферный волновод (рис. 3).

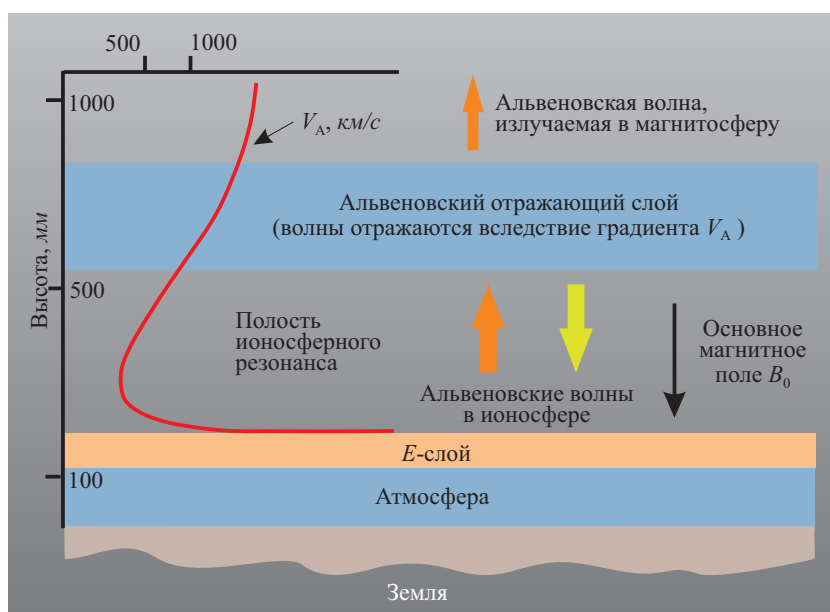


Рис. 3

При этом спектры как электрических, так и магнитных компонент должны обладать резонансной структурой. Спектральная амплитуда внутри ИАР может колебаться в зависимости от высоты в соответствии с расположением узлов и пучностей стоячей альвеновской моды. Обнаружение УНЧ-отклика на отдельный мощный молниевый разряд на низкоорбитальных спутниках вполне возможно современной аппаратурой, но эта возможность пока не реализована.



## СТРАТОСФЕРНЫЕ И МЕЗОСФЕРНЫЕ ГИГАНТСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ

В последнее время интенсивно исследовались открытые три десятилетия назад нестационарные оптические явления (*Transient Luminous Events, TLEs*), возникающие над грозовыми облаками (спрайты, голубые джеты, эльфы, тролли, гало и др.) [2]. Наземные наблюдения высотных оптических явлений затруднительны, поскольку они скрыты грозовыми облаками, поэтому широко применяются спутниковые наблюдения. В частности, большой объём информации был получен с помощью спутников *ROCSAT-2, FORMOSTAT-2* и других космических аппаратов.

Спрайты возникают через 1 – 10 мс после интенсивных разрядов облако – земля, зарядовый момент которых превосходит 500 Кл·км. Предполагается, что зародыш спрайта возникает в мезосфере на высоте, где электростатическое поле некомпенсированного заряда тучи превосходит по напряжённости поле электрического пробоя на данной высоте. В финальной стадии своего развития верхняя часть спрайта имеет вид диффузной области красноватого цвета, занимающей интервал высот 50 – 90 км при поперечном размере 20 – 30 км. Его часть, расположенная ниже 50 км, имеет филаментарную структуру голубоватого оттенка. Наземные измерения в УНЧ- и радиодиапазоне показали, что спрайт обуславливает локальные изменения параметров нижней ионосферы, в частности её ионизацию и электропроводность.

Голубые джеты, а также их разновидности – голубые стартёры и гигантские джеты – представляют собой конусообразные светящиеся струи, возникающие на вершине облака на высотах 17 – 18 км. Голубой джет, по видимому, представляет собой положительный или отрицательный лидер, окружённый стримерной короной, который распространяется вверх до высот 25 – 90 км и может переносить в ионосферу гигантский заряд вплоть до 120 – 140 Кл. Однако физические механизмы электрических разрядов, обуславливающие появление светящихся объектов, до конца не изучены. В частности, не выяснена роль механизма пробоя воздуха на убегающих релятивистских электронах. Хотя этот механизм позволил бы объяснить появление направленных вверх вспышек ультрафиолетового и гамма-излучений, которые наблюдаются над областями с грозовой активностью.

Поскольку электрический ток, генерируемый спрайтами и ГД, может непосредственно замыкаться на нижний проводящий *E*-слой ионосферы, следует ожидать возбуждения в ионосфере токов с масштабами в десятки и сотни километров и их трансформации в альвеновские волны, переносящие энергию спрайтов и джетов в магнитосферу. С этой точки зрения представляется перспективным дополнить оптические наблюдения спрайтов и ГД с помощью низкоорбитальных спутников исследованием их электромагнитных полей и волн, излучаемых в магнитосферу.

## АНТРОПОГЕННАЯ АКТИВНОСТЬ

Помимо естественных процессов атмосферного электричества возможно и возникновение молний искусственного происхождения. Специфические молнии появляются при наземных и подземных ядерных взрывах. Интенсивные молнии (несущие ток от 200 до 600 кА), идущие из Земли в атмосферу, наблюдались при наземном ядерном взрыве *Mike* [14]. Успешно

проводились эксперименты по электрическому пробое атмосферы лазерными импульсами [15]. Лазерный импульс создаёт канал ионизированного газа, через который и происходит пробой между грозовым облаком и Землёй. Также искусственно вызванные молнии появлялись при полёте ракет, несущих разматывающуюся тонкую проволоку. Эта проволока создавала канал для пробоя между грозовым облаком и Землёй. Хорошо известен случай возникновения электрических разрядов между ракетой и Землёй в области выброса ионизированных газов от ракетных двигателей, произошедший через 36 и 52 с после запуска космического корабля *Apollo-12* и приведший к повреждению части электроники. Невольным триггером молний могут быть самолёты. Известны многочисленные случаи, когда при их пролёте через интенсивную атмосферную конвективную область возникали молнии. Согласно статистическим данным каждый крупный самолёт подвергается удару молнии примерно раз в год.

В результате промышленной деятельности околоземное пространство заполнено электромагнитными излучениями КНЧ-, ОНЧ-, ВЧ-диапазонов. В целом вклад антропогенных излучений в бюджет природных шумов и излучений в околоземном пространстве невелик, но локально излучения мощных радиопередатчиков могут способствовать заметному изменению свойств ионосферы.

Протяжённые электрические сети являются источником проникающих в космос излучений при частотах 50 – 60 Гц, а также их гармоник (до 3 кГц). Излучения с частотами 50 – 60 Гц от наземных линий электропередач были зарегистрированы в верхних слоях ионосферы на микроспутнике «Чибис-М». В целом же вопрос о том, насколько велико воздействие промышленной деятельности на электромагнитную экологию околоземного пространства, остаётся открытым.

### **ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ**

Влияние молний на параметры ионосферной и магнитосферной плазмы и электромагнитные поля ОКП оказывается более существенным, чем это предполагалось ранее. В диапазоне частот в десятки килогерц проникновение в магнитосферу «свистов», инициируемых молниями, приводит к выплыванию энергичных электронов из радиационных поясов Земли. В частотном диапазоне от долей до десятков герц это явление было обнаружено низкоорбитальными спутниками. Однако этот частотный диапазон остаётся мало исследованным. Опыт измерений посредством спутника *C/NOPS* и теоретические оценки показывают, что для изучения проблемы проникновения глобальных электромагнитных резонансов в ионосферу необходимо оснащение спутников высокочувствительными электрическими антеннами и трёхкомпонентными магнитометрами с чувствительностями меньше  $10 \text{ нВ}/(\text{м}\cdot\text{Гц}^{1/2})$  и  $0,3 \text{ нТл}/\text{Гц}^{1/2}$  соответственно. Благоприятные условия для регистрации ШР в ионосфере существуют на ночной стороне Земли, поскольку ночью практически исчезают нижние проводящие слои ионосферы, в результате чего создаётся окно, через которое может выходить электромагнитная энергия ШР, накопленная в волноводе Земля – ионосфера.

Регистрация резонансных спектров ИАР в ионосфере имеет свою специфику, обусловленную тем, что орбита спутника должна пройти вблизи пучности, где амплитуда стоячей альвеновской волны максимальна. Ещё одна нерешённая проблема заключается в том, как возбуждается ИАР: снизу за счёт молний или основной источник возбуждения находится сверху – это различного рода волны и возмущения, приходящие из магнитосферы. Для определения направления распространения альвеновских волн и других возмущений необходимо определять поляризацию волн.

Измерение магнитных полей в ОКП с высокой точностью в перспективе связано, по всей видимости, с применением атомных магнитометров, размещённых на борту космических аппаратов, объединённых в группировку, подобную *SWARM*. Атомные магнитометры, предназначенные для космических исследований, существуют уже более 40 лет. Однако внедрение микросистемных технологий и лазеров позволило достичь значительного прогресса. В частности, разработанный в США прототип миниатюрного атомного скалярного магнитометра, основанный на изотопе рубидия  $^{87}\text{Rb}$  и предназначенный для работы в космосе, весит менее 0,5 кг, потребляет энергии менее 1 Вт и имеет чувствительность  $15 \text{ нТл/Гц}^{1/2}$  на частоте в 1 Гц [16]. Такой чувствительности при условии расширения полосы частот до сотен герц могло бы оказаться достаточным для исследования ШР и ИАР в ионосфере. Существуют также разработки векторных атомных магнитометров.

Необходимо отметить, что интерес к изучению комплекса воздействий грозовой активности на геофизические среды, технические и биологические объекты постоянно возрастает, однако исследование природы этих взаимодействий с использованием теоретических моделей без привлечения получаемых только космическими средствами количественных данных об изменении параметров явлений и процессов в ОКП невозможно. Рассмотрим некоторые действующие и разрабатываемые космические проекты для изучения механизмов электромагнитного взаимодействия атмосферы и ионосферы.

***Geostationary Lightning Mapper.*** С 2016 г. начал работать первый монитор молний на геостационарной орбите ([www.goes-r.gov](http://www.goes-r.gov), [www.nasa.gov/goes](http://www.nasa.gov/goes)) над американским континентом. Геостационарный спутник *GOES-R (GOES-16)* оборудован инфракрасной оптической камерой *CCD* с полосой частот 777,4 нм, позволяющей круглосуточно регистрировать с вероятностью до 90% и с точностью локации до 10 км все виды разрядов (внутриоблачные, межоблачные, облако – земля) как над сушей, так и над океаном.

***TARANIS (Tool for the Analysis of RAdiations from lightNIngs and Sprites).*** Это специализированный спутниковый проект Французского космического агентства, касающийся комплексного наблюдения переноса энергии грозовых разрядов из нейтральной атмосферы в ионосферу и магнитосферу ([smc.cnes.fr/TARANIS](http://smc.cnes.fr/TARANIS)). Аппарат, который предполагается запустить в 2019 г., будет находиться на высоте 700 км в течение 2 – 3 лет. Его аппаратный комплекс включает в себя 2 камеры в оптическом и ИК-(600–900 нм) диапазонах; 3 фотометра (600–900 нм); датчики рентгеновского и гамма-излучений, прибор для регистрации пучков релятивистских (1 – 10 МэВ) электронов. Детекторы частиц позволяют регистрировать тонкие спектральные, питч-угловые и энергетические характеристики потоков электронов

(0,07 – 4 МэВ) с высоким временным разрешением. Электромагнитные излучения регистрируются электрическими антеннами в диапазонах от DC до 1 МГц и 0,1 – 35 МГц, а также магнитометрами в полосе частот от 0,1 Гц до 1 МГц. Это будет наиболее полный из всех проведенных до сих пор экспериментов по изучению импульсного локального ускорения и высыпания электронов во время грозовой активности.

**ASIM (Atmosphere-Space Interactions Monitor).** Блок ASIM, разрабатываемый Европейским космическим агентством, будет установлен на внешней платформе Международной космической станции (МКС) ([www.asim.dk](http://www.asim.dk)) в 2018 г. Этот блок аппаратуры, предназначенный для изучения связи гроз в атмосфере и мезосфере с возмущениями в ионосфере и высыпанием частиц из радиационных поясов Земли, включает в себя несколько высокоскоростных телевизионных камер для наблюдения TLEs и пучков релятивистских электронов над грозами, фотометры с частотой 100 кГц и рентгеновский датчик.

**Трабант.** В настоящее время в ИКИ РАН разрабатывается проект «Трабант», согласно которому планируется вывод в 2020 г. в инфраструктуре российского сегмента МКС синхронно двух идентичных микроспутников для исследования механизмов возникновения ионосферных неоднородностей различных масштабов, плазменных и электромагнитных возмущений природного и техногенного характера в ионосфере в широком динамическом и частотном диапазонах, а также для изучения пространственной структуры неоднородностей ионосферы. Этот проект является развитием программы действия микроспутника «Чибис-М» (масса 40 кг), работавшего с 2012 по 2014 г. (<http://chibis.cosmos.ru>). Научная аппаратура каждого микроспутника включает в себя феррозондовый и индукционный магнитометры, электрический зонд, радиочастотный регистратор в диапазоне 26 – 48 МГц электрической активности высотных молниевых разрядов, магнитно-волновой комплекс для изучения электромагнитных возмущений (в диапазоне 0,1 – 40 кГц), фазовый измеритель электронной концентрации, электронный и ионный спектрометры. Микроспутники будут запущены по оригинальной схеме: транспортный корабль «Прогресс» после отделения от МКС будет поднят на орбиту ~500 км, где оба аппарата будут выпущены из транспортно-пускового контейнера на орбиту. В процессе эксперимента расстояние между микроспутниками будет меняться от 0,1 до 10 км.

Это далеко не полный перечень космических исследований влияния грозовой активности атмосферы на геофизическую обстановку в ОКП. Однако количественных данных об изменчивости параметров околоземной среды по-прежнему недостаточно, ввиду чего предполагается расширение прикладных исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен обзор и анализ работ по изучению воздействия атмосферного электричества на геофизические среды, позволившие определить влияние грозовых разрядов на энергообменные процессы в верхней атмосфере, ионосфере и магнитосфере (шумановский резонатор, альвеновский резонатор, высыпание ионизированных частиц, магнитные и электрические поля,

электромагнитные волны и др.), а также влияние на ОКП антропогенных воздействий в радиодиапазоне.

Определено, что молнии являются мощным источником электромагнитного излучения с максимумом спектральной плотности в УНЧ – КНЧ-диапазоне (до  $\sim 50$  Гц) в котором лежат собственные частоты некоторых природных резонаторов и волноводов, что приводит к резонансным эффектам, и, соответственно, накоплению энергии, обуславливающему изменение параметров ионосферной плазмы.

Выявлено, что ОНЧ-импульс грозового разряда вызывает триггерный эффект, приводящий к высвобождению волновой энергии и мощному возмущению геофизической системы, сопровождающемуся выпадением электронов.

Установлено, что грозовая активность является основным источником энергии шумановских резонансов, возникающих в сферической полости Земля – ионосфера в диапазоне частот от 7,8 до 50 Гц.

Выявлено, что оптические явления в верхних слоях атмосферы (спрайты, джетты, тролли и др.) возникают через 1 – 10 мс после разрядов облако – земля, зарядовый момент которых превосходит 500 Кл·км, что приводит к изменению ионизации и электропроводности нижних слоёв ионосферы.

Получена оценка влияния молний искусственного происхождения, инициированных наземными и подземными мощными взрывами, лазерными импульсами и другими факторами.

Рассмотрены некоторые космические проекты (реализованные и разрабатываемые) по исследованию влияния молний на геофизическую обстановку, а также определены предельные параметры бортовой аппаратуры регистрации изменений параметров геофизических сред.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Pilipenko V.A.* Impulsive Coupling Between the Atmosphere and Ionosphere/Magnetosphere. – *Space Science Review*, 2012, v. 168, № 1, pp. 533 – 550.
2. *Surkov V., Hayakawa M.* Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields. – *Springer Geophysics Series*, 2014, v. XVI, 486 p.
3. *Inan U.S., Carpenter D.L.* Lightning-induced Electron Precipitation Events Observed at  $L = 2,4$  as Phase and Amplitude Perturbations on Subionospheric VLF Signals. – *Geophysics Research*, 1987, v. 92, pp. 3293 – 3303.
4. *Bortnik J., Inan U.S., Bell T.F.* Temporal Signatures of Radiation Belt Electron Precipitation Induced by Lightning-generated MR Whistler Waves: 1. Methodology. – *Geophysics Research*, 2006, v. 111, A02204.
5. *Chum J., Jiricek F., Santolik O.* et al. Assigning the Causative Lightning to the Whistler Observed on Satellites. – *Annales Geophysicae*, 2006, v. 24, pp. 2921 – 2929.
6. *Graf K.L., Inan U.S., Piddychiy D.* et al. DEMETER Observations of Transmitter-induced Precipitation of Inner Radiation Belt Electrons. – *Geophysics Research*, 2009, v. 114, A07205.
7. *Burke W.J., Aggson T.L., Maynard N.C.* et al. Effects of a Lightning Discharge Detected by the DE 2 Satellite over Hurricane Debbie. – *Geophysics Research*, 1992, v. 97, pp. 6359 – 6367.
8. *Simões F., Pfaff R., Freudenreich H.* Satellite Observations of Schumann Resonances in the Earth's Ionosphere. – *Geophysics Research Letters*, 2011, v. 38, L22101.
9. *Surkov V.V., Nosikova N.S., Plyasov A.A.* et al. Penetration of Schumann Resonances into the Upper Ionosphere. – *Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, v. 97, pp. 65 – 74.

10. *Pilipenko V., Dudkin D., Fedorov E.* et al. IAR Signatures in the Ionosphere: Modeling and Observations at Microsatellite Chibis-M. – *Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, v. 154, pp. 217 – 225.
11. *Plyasov A.A., Surkov V.V., Pilipenko V.A.* et al. Spatial Structure of the Electromagnetic Field Inside the Ionospheric Alfvén Resonator Excited by Atmospheric Lightning Activity. – *Geophysical Research*, 2012, v. 117, A09306.
12. *Simões F., Klenzing J., Ivanov S.* et al. Detection of Ionospheric Alfvén Resonator Signature. – *Geophysies Research*, 2012, v. 117, A11305.
13. *Surkov V.V., Pilipenko V.A.* Spectral Signatures of the Ionospheric Alfvén Resonator to Be Observed by Low Earth Orbit Satellite. – *Geophysies Research*, 2016, v. 121, pp. 2783 – 2794.
14. *Uman M.A., Seacord D.F., Price G.H.* et al. Lightning Induced by Thermonuclear Detonations. – *Geophysies Research*, 1972, v. 77, pp. 1591 – 1596.
15. *Khan N., Mariun N., Aris I.* et al. Laser-triggered Lightning Discharge. – *New Journal of Physics*, 2002, pp. 61.1 – 61.20.
16. *Korth H., Strohbahn K., Tejada F.* et al. Miniature Atomic Scalar Magnetometer for Space Based on the Rubidium Isotope  $^{87}\text{Rb}$ . – *Geophysies Research*, 2016, v. 121, pp. 7870 – 7880.