

Определение местоположений сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских резонансов

А. В. Колосков, О. В. Буданов, В. Г. Безродный, Ю. М. Ямпольский

Радиоастрономический Институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: koloskov@rian.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 26 мая 2004 г.

В работе предложена методика локации сверхмощных молниевых разрядов по данным магнитных наблюдений в СНЧ диапазоне (3 ± 300 Гц). Для восстановления положений источников этих разрядов используются поляризационные характеристики и времена прихода СНЧ всплесков, измеренные в пространственно разнесенных пунктах. При расчетах учитываются поправки к пеленгам источников, связанные с гиротропией резонатора Земля–ионосфера. Основной массив данных накоплен авторами на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский”. Также использованы СНЧ записи, полученные на японской станции Сиова в Антарктике и обсерватории Онагава (Япония). Описанная методика использована для восстановления координат разрядов, зарегистрированных за период 27–30 октября 2002 г. Выполнено сопоставление полученных пространственных и пространственно-временных распределений сверхмощных событий с известными из сети Интернет данными спутникового мониторинга в оптическом диапазоне.

У роботі запропоновано методику локації надпотужних розрядів блискавки за даними магнітних спостережень у ННЧ діапазоні (3 ± 300 Гц). Для відновлення положень джерел цих розрядів випромінювання використовуються поляризаційні характеристики і час приходу ННЧ сплесків, що їх отримано в просторово рознесених пунктах. У розрахунках враховуються поправки до пеленгів на джерела, пов'язані з гіротропією резонатора Земля–іоносфера. Основний масив даних накопичено авторами на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський”. Також використано ННЧ записи, що їх отримано на японській станції Сиова в Антарктиці й обсерваторії Онагава (Японія). Описану методику використано у відновленні координат розрядів, зареєстрованих за період 27–30 жовтня 2002 р. Отримані просторові та просторово-часові розподіли надпотужних подій зіставлено з відомими із мережі Інтернет даними супутникового моніторингу в оптичному діапазоні.

Введение

Основным источником естественного электромагнитного излучения в диапазоне сверхнизких частот (СНЧ, 3 ± 300 Гц) является мировая грозовая активность. Известно, что вертикальные молниевые разря-

ды возбуждают в полости Земля–ионосфера СНЧ сигналы, способные многократно огигать Землю. Интерферируя, они образуют структуру резонансных максимумов на частотах вблизи 8, 14, 20 и т. д. Гц, называемых шумановскими резонансами (ШР) [1, 2]. В параметрах СНЧ сигналов содержится

информация о мировой грозовой активности, изучение которой представляет значительный интерес в силу ее взаимосвязи с глобальными климатическими изменениями. В литературе имеется большое число свидетельств, демонстрирующих высокую корреляцию параметров СНЧ полей в диапазоне ШР с температурой в тропических регионах [3] и влажностью на высотах верхней тропосферы [4]. Поэтому наблюдение шумановских резонансов представляется важной практической задачей.

В соответствии с литературными данными, каждую секунду на земном шаре происходит свыше 100 молниевых разрядов средней мощности, случайно распределенных во времени и пространстве [5]. Импульс от каждого индивидуального разряда на больших удалениях неразличим на фоне интегрального шумоподобного СНЧ сигнала. В то же время, в среднем несколько раз в минуту, происходят сверхмощные разряды, проявляющиеся в виде хорошо выделенных на общем шумовом фоне дискретных всплесков излучения, называемых Q-всплесками [6]. Исследования последних лет [7, 8] показывают, что многие Q-всплески можно связать со спрайтами – сверхмощными разрядами, происходящими в мезосфере на высотах 40 ÷ 90 км. Несмотря на то, что в последнее время исследованию сверхмощной молниевой активности уделяется большое внимание, глобальные пространственные и временные распределения этих событий изучены еще недостаточно.

Для молниевых разрядов средней мощности известно, что основными местами их локализации являются три центра мировой грозовой активности, расположенные в приэкваториальных районах Юго-Восточной Азии, Африки и Америки. Максимум активности каждого из этих грозовых центров приходится на предзаходные часы местного времени [9]. Вопрос о пространственном и временном распределении сверхмощных разрядов изучен не столь подробно. Относительно небольшое число систематических данных о сверхмощной молниевой активности объясняется сложностью изуче-

ния этих событий в масштабах всей планеты. Непрерывный мониторинг спрайтов в оптическом диапазоне затруднен их коротким временем жизни – несколько десятков миллисекунд и менее, небольшим разномом времени (несколько миллисекунд) между спрайтом и инициирующим его молниевым разрядом “облако-земля” [10]. Кроме того, возможности измерений в оптическом диапазоне с поверхности Земли ограничиваются облачным покровом, а при наблюдении из космоса – условиями освещенности.

Значительные успехи в понимании физики сверхмощных молниевых разрядов достигнуты при обработке наблюдений, проводимых одновременно в СНЧ и СДВ диапазонах. Используя данные, полученные в полосе частот $5 \div 22 \cdot 10^3$ Гц, удается восстанавливать структуру токов молниевых разрядов и измерять величину перенесенного им заряда [11, 12]. Синхронные оптические измерения дают информацию о временной эволюции светящихся областей сверхмощного разряда [13]. Однако исследования в СДВ диапазоне имеют ограничения по дальности в связи с ростом затухания сигнала при увеличении частоты. Используя СНЧ данные, удается диагностировать сверхмощные разряды на значительных расстояниях. Так, например, в работе [14] рассмотрен комбинированный метод синхронных наблюдений в СНЧ и СДВ диапазонах, позволяющий обнаруживать сверхмощные события на расстояниях до 11 тыс. км от наблюдателя. Для получения глобальных распределений сверхмощных разрядов по всему земному шару целесообразно использовать результаты наблюдений, производимых в СНЧ диапазоне. Тогда, ограничившись двумя [15, 16] либо тремя [17] наблюдательными пунктами, можно восстанавливать общепланетарные распределения сверхмощной молниевой активности. Идеальным “полигоном” для таких наблюдений является Антарктика, в которой практически отсутствуют местные грозы, представляющие основную помеху в СНЧ диапазоне, и минимальны низкочастотные помехи техногенного происхождения. В настоящей работе предложена многопозиционная поля-

ризация методика локации сверхмощных молниевых разрядов и проведено восстановление их глобальных временных и пространственных распределений. Основной массив данных накоплен авторами на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский” [18]. Для модельных расчетов использована разработанная в РИ НАНУ оригинальная асимптотическая теория СНЧ полей в гиротропном резонаторе Земля–ионосфера [19], учитывающая влияние постоянного магнитного поля Земли.

Аппаратура и первичная обработка данных

Начиная с мая 2001 г. на УАС “Академик Вернадский” (65.3° ю. ш., 64.3° з. д.) проводились систематические наблюдения вариаций горизонтальной компоненты магнитного поля с помощью СНЧ приемника, разработанного в РИ НАНУ [20]. С 2002 г. аналогичные регистрации ведутся двухканальным индукционным магнитометром LEM112A, изготовленным Львовским центром Института космических исследований НАНУ – НКАУ. Основой приемного устройства являются 2 магнитных датчика, вынесенных на расстояние 500 м от основных помещений станции. Датчики размещены в горизонтальной плоскости и образуют в ней ортогональный базис вдоль географических меридиана и параллели. Область регистрируемых частот ограничена полосой 0.3 ÷ 300 Гц. Неравномерность коэффициента передачи в полосе приема не превышает 1.5 дБ. Межканальная неидентичность АЧХ составляет 1 %. Уровень собственных шумов в рабочем диапазоне частот не более 0.03 пТл/Гц. Режекция сигналов частоты энергосети УАС, 50 Гц, и ее гармоник не производится. Сигналы от датчиков в аналоговом виде по кабелям длиной 50 м поступают на 16-разрядный АЦП, где оцифровываются и записываются на жесткий диск регистрирующего компьютера. Временная синхронизация осуществляется в начале каждого сеанса записи по меткам времени со встроенного GPS приемника. Сигналы записываются непрерывно файлами

длительностью в одни сутки и архивируются на CD. При проведении многопозиционной обработки СНЧ полей были использованы также первичные экспериментальные данные, полученные коллегами из университета Тохоку (Япония) на японской станции Сиова в Антарктиде (69.0° ю. ш., 39.6° в. д.) и обсерватории Онагава в Японии (38.4° с. ш., 141.5° в. д.) и любезно предоставленные в распоряжение авторов. Аппаратура, с помощью которой выполнялись эти измерения, в целом аналогична установленной на УАС. Основные отличия состояли в использовании более узкой полосы частот (1 ÷ 100 Гц) и ориентации датчиков в геомагнитной системе координат. Более подробно с характеристиками соответствующей приемной аппаратуры можно ознакомиться в работах [15, 16].

Для синхронной обработки использовались данные наблюдений с 27 по 30 октября 2002 г. Выбор временного интервала был обусловлен сроками специальной измерительной кампании, проведенной РИ НАНУ совместно с университетом г. Тромсё (Норвегия) и группой EISCAT [21], и наличием для этого периода непрерывных суточных регистраций во всех трех наблюдательных пунктах. На первом этапе обработки, с целью исключения влияния низкочастотных помех и гармоник местной силовой электросети, экспериментальные записи $H_x(t)$, $H_y(t)$ ортогональных магнитных компонент полей с датчиков “юг-север” и “запад-восток” были отфильтрованы цифровым полосовым фильтром 3 ÷ 40 Гц и приведены к единой частоте дискретизации 100 Гц. Затем из всей совокупности данных отбирались события, для которых полная амплитуда горизонтальной компоненты магнитного поля,

$$H_{\text{total}}(t) = \sqrt{H_x^2(t) + H_y^2(t)}, \quad (1)$$

превышала заданную минимальную пороговую амплитуду $H_{\text{thr0}} = 15$ пТл, а сами всплески в разных наблюдательных пунктах были разнесены во времени не более чем

на 0.08 секунды. Такой разнос равен времени распространения СНЧ сигнала со скоростью 0.8c [17] между наиболее удаленными пунктами наблюдения УАС – Онагава (дистанция ~16600 км). Величина минимального порога H_{thr0} соответствовала приблизительно пятикратному превышению амплитуды всплеска над средними за сутки стандартами флуктуаций горизонтальной компоненты магнитного поля во всех наблюдательных пунктах.

Для определения координат источников всплесков применялась поляризационная обработка сигналов, суть которой состояла в следующем. По временным интервалам $T = 1$ с, полностью содержащим всплески, строились комплексные спектры ортогональных магнитных компонент сигналов в каждом из наблюдательных пунктов:

$$\tilde{H}_{x,y}(f) = \frac{1}{T} \int_0^T dt H_{x,y}(t) e^{-i2\pi ft} \equiv |\tilde{H}_{x,y}(f)| e^{i\delta_{x,y}(f)}, \quad (2)$$

где $|\tilde{H}_{x,y}(f)|$ и $\delta_{x,y}(f)$ – спектральные амплитуды и фазы этих компонент. Затем рассчитывались параметры Стокса $I(f)$, $Q(f)$, $U(f)$, $V(f)$ [22]:

$$\begin{aligned} I(f) &= |\tilde{H}_x(f)|^2 + |\tilde{H}_y(f)|^2, \\ Q(f) &= |\tilde{H}_x(f)|^2 - |\tilde{H}_y(f)|^2, \\ U(f) &= 2|\tilde{H}_x(f)\tilde{H}_y^*(f)|\cos(\delta_x - \delta_y), \\ V(f) &= 2|\tilde{H}_x(f)\tilde{H}_y^*(f)|\sin(\delta_x - \delta_y). \end{aligned} \quad (3)$$

В дальнейшем параметры Стокса использовались для определения коэффициента эллиптичности $r(f)$ и позиционного угла эллипса поляризации $\Psi(f)$:

$$\begin{aligned} r(f) &= \\ &= \frac{V(f)}{\sqrt{Q^2(f) + U^2(f)} + \sqrt{Q^2(f) + U^2(f) + V^2(f)}}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \Psi(f) \\ \cos \Psi(f) \end{aligned} \right\} = \frac{1}{\sqrt{Q^2(f) + U^2(f)}} \begin{Bmatrix} U(f) \\ Q(f) \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

Как известно, абсолютная величина коэффициента эллиптичности определяется соотношением малой и большой полуосей эллипса поляризации, а знак – направлением вращения вектора поляризации. Во введенных нами выше системах локальных декартовых координат (x, y) положительным значениям r соответствует (см. (2)-(4)) положительная разность фаз спектральных компонент, $\delta_x - \delta_y > 0$, приводящая к вращению вектора $\tilde{H}(f)$ по часовой стрелке, отрицательным r соответствует $\delta_x - \delta_y < 0$ и вращение в противоположную сторону. Позиционный угол Ψ характеризует наклон большой оси эллипса поляризации к направлению на север, положительные значения отсчитываются по часовой стрелке.

Методика определения местоположений источников СНЧ всплесков

Методики всех экспериментальных работ по пеленгации мировых грозных центров и сверхмощных молниевых разрядов в СНЧ диапазоне, известных авторам из литературы, используют существенное упрощающее предположение о поперечном характере глобальных СНЧ полей. Такое предположение оправдано, однако только в изотропном приближении, т. е. при достаточно слабом влиянии геомагнитного поля на свойства резонатора Земля–ионосфера. В этом случае, в связи с малостью высоты резонатора по сравнению с длиной волн ШР и высокой проводимостью границ, эффективно возбуждаться в нем могут только СНЧ колебания ТМ-типа. Магнитная компонента таких колебаний поляризована линейно и ориентирована в горизонтальной плоскости по нормали к направлению на источник излучения [9]. В то же время целый ряд экспериментальных исследований, проведенных в последние годы

(см., например, [18, 23, 24]), убедительно демонстрирует эллиптический характер поляризации СНЧ полей в нижней, наиболее энергонесущей части диапазона. Такие поляризационные свойства сигналов обусловлены существенным влиянием постоянного геомагнитного поля и свидетельствуют о наличии у полей шумановских резонансов заметной продольной составляющей, которая должна учитываться при восстановлении направления на источник по СНЧ данным.

Хотя сам факт отклонения нормали к фазовому фронту СНЧ колебаний в гиротропном резонаторе Земля–ионосфера от направления прихода волны был отмечен в литературе уже достаточно давно [9], однако количественное описание явления дано лишь в последнее время в работе [19]. В ней показано, что гиротропия резонатора проявляется в “кажущемся” смещении всех источников излучения по долготе на угол $\Delta\varphi(f)$ в сторону запада и в возбуждении эллиптической поляризации магнитной составляющей поля, которая также полностью описывается в терминах $\Delta\varphi$. Величина долготного смещения $\Delta\varphi$ не зависит при этом от координат источников и приемного пункта, а определяется лишь частотой СНЧ колебаний и соотношением гирочастоты электронов и частоты их соударений с нейтралами на высотах ионосферной границы резонатора. Из результатов [19] следует также, что связанное с гиротропией смещение $\Delta\alpha_j(f)$ пеленга каждого j -го источника СНЧ излучения относительно его истинного значения α_j и коэффициент эллиптичности $r_j(f)$ равны между собой по величине, противоположны по знаку и описываются формулой:

$$r_j(f) = -\Delta\alpha_j(f) = -\Delta\varphi(f) \frac{\cos\theta - \cos\theta_j \cos\vartheta_j}{\sin^2\vartheta_j} = -\Delta\varphi(f) \cos\beta_j \frac{\sin\theta_j}{\sin\vartheta_j}. \quad (6)$$

Здесь использована геоцентрическая сферическая система координат (см. рис. 1) с по-

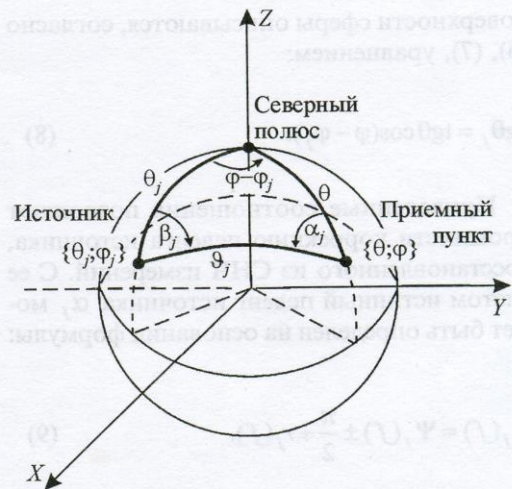


Рис. 1. Геоцентрическая сферическая система координат, используемая при расчете местоположений источников сверхмощных всплесков

лярной осью Z , ориентированной на географический север, источнику сопоставляются координаты $\{\theta_j, \varphi_j\}$, приемному пункту – $\{\theta, \varphi\}$. Направления на источник и на приемный пункт, α_j, β_j , отсчитываются от севера, в качестве положительных приняты отсчеты по часовой стрелке. Указанные характеристики, а также угловое расстояние ϑ_j между пунктами излучения и приема связаны с координатами этих пунктов известными соотношениями сферической тригонометрии:

$$\begin{aligned} \cos\alpha_j &= \frac{\cos\theta_j - \cos\theta \cos\vartheta_j}{\sin\theta \sin\vartheta_j}, \\ \cos\beta_j &= \frac{\cos\theta - \cos\theta_j \cos\vartheta_j}{\sin\theta_j \sin\vartheta_j}, \\ \cos\vartheta_j &= \cos\theta_j \cos\theta + \sin\theta_j \sin\theta \cos(\varphi - \varphi_j). \end{aligned} \quad (7)$$

Как следует из формулы (6), значения $r < 0$ (вращение вектора $\vec{H}(f)$ против часовой стрелки) реализуются при углах $\beta_j < \pi/2$, значения $r > 0$ (вращение по часовой стрелке) – при $\beta_j > \pi/2$. Линии смены знака r на

поверхности сферы описываются, согласно (6), (7), уравнением:

$$\operatorname{tg}\theta_j = \operatorname{tg}\theta \cos(\varphi - \varphi_j). \quad (8)$$

Приведенные соотношения позволяют произвести коррекцию пеленга источника, восстановленного из СНЧ измерений. С ее учетом истинный пеленг источника α_j может быть определен на основании формулы:

$$\alpha_j(f) = \Psi_j(f) \pm \frac{\pi}{2} + r_j(f). \quad (9)$$

Заметим, что (9) определяет пеленг источника в локальной системе координат, связанной с ориентацией магнитных сенсоров в данном пункте наблюдения. Чтобы привести значение α к единой “географической” координатной системе, необходимо для пунктов Сиова и Онагава учесть величину склонения геомагнитного поля, определяющую угол поворота “геомагнитной” системы координат относительно “географической”. Отметим также, что величина α определена с точностью до π . Поэтому она может быть использована для построения дуги большого круга, проходящего через точку наблюдения и источник, но не позволяет отделить прямой сигнал от кругосветного.

Выражения (1)-(9) были использованы для определения коэффициентов эллиптичности и азимутов на источники всплесков с учетом поправки, вызванной гиротропией. Расчеты выполнялись для первой моды ШР. При определении пеленгов на источник и коэффициента эллиптичности использовались параметры Стокса, усредненные в интервале частот соответствующего спектрального максимума, $7 \div 9$ Гц. Координаты источников всплесков определялись методом триангуляции. Для каждого наблюдательно-пункта восстанавливались дуги большого круга, соответствующие направлениям на источник, вычисленным согласно (9). Из-за наличия фоновых шумов определенные из эксперимента линии пеленга на ис-

точник, как правило, не пересекались в одной точке. Поэтому в работе оценивалось наиболее вероятное положение источника. Предполагалось, что ему соответствует минимум функционала невязок L_j^2 , задаваемого как сумма квадратов расстояний $L_{kj}^2(\theta_j, \varphi_j)$ от искомого положения j -го источника до линий пеленга, восстановленных из k -х пунктов наблюдения ($k = 1, 2, 3$):

$$L_j^2 = \sum_{k=1}^3 L_{kj}^2(\theta_j, \varphi_j),$$

где θ_j, φ_j – координаты j -го источника. Минимизация функционала невязок и определение наиболее вероятных координат источников осуществлялись численно. Для каждого всплеска рассчитывалось также среднее отклонение линий пеленга от наиболее вероятного положения источника

$$l_j = \frac{1}{3} \left(\sum_{k=1}^3 L_{kj}(\theta_j, \varphi_j) \right). \text{ Величины } \langle l \rangle \sim 600 \text{ км}$$

и $\sigma_l = \sqrt{\langle (l_j - \langle l \rangle)^2 \rangle} \sim 500$ км, полученные путем усреднения по всем всплескам, зарегистрированным за время наблюдения, характеризуют среднюю ошибку определения положения источника. Рассчитывая ее как сумму $\langle l \rangle + \sigma_l$, получим оценку погрешности определения координат: $\Delta D \sim 1100$ км. Отметим, что данная оценка достаточно эвристична. Для ее уточнения желательно в будущем сопоставить координаты источников, восстановленных по описанной выше методике и по данным СДВ или оптических наблюдений.

В силу свойств сферической геометрии каждому положению источника соответствует его симметричный антипод. Выбор истинного положения из пары источник-антипод производился согласно методике, изложенной в работах [16, 17], исходя из разности времен прихода переднего фронта импульса в приемные пункты. Для расчетов указанной разности использовались исходные широкополосные записи без цифровой фильтрации $3 \div 40$ Гц, которая приводит к уменьшению крутизны переднего фронта

всплеска. Оценивая разность времен прихода импульса в два приемных пункта и сопоставляя ее с различиями расстояний до источника и антипода, можно локализовать источник. В двухпозиционном варианте остается неоднозначность для разрядов, происходящих вблизи линии равных задержек до наблюдательных пунктов. При использовании трех приемных пунктов неоднозначность селекции источник–антипод исключена. Задача временной селекции решалась с преимущественным использованием данных приемных пунктов Сиова и Онагава, поскольку точность временной синхронизации для них была выше, чем на УАС.

Результаты обработки и их обсуждение

На рис. 2, а-д представлено число всплесков, регистрируемых в пунктах наблюдения, с амплитудой выше порогового уровня, который отложен по оси абсцисс. Кривые характеризуют скорость убывания числа всплесков с увеличением пороговой амплитуды. Данные приведены для двух антарктических станций, УАС и Сиова, в диапазоне амплитуд от 15 пТл (минимальный порог обнаружения всплеска) до 65 пТл. При построении зависимостей рассматривались только события, которые одновременно наблюдались на обеих станциях, что уменьшало вероятность принятия локальной помехи за СНЧ всплеск. На рис. 2, а-г показаны суточные зависимости с 27 по 30 октября 2002 г., на рис. 2, д – усредненная суточная зависимость для всего периода наблюдений. Как видно из рисунков, в среднем за сутки регистрируется около 800 совпадающих по времени сверхмощных всплесков с амплитудой больше 15 пТл. С увеличением пороговой амплитуды число всплесков экспоненциально падает. Обращает на себя внимание тот факт, что различия в скоростях спада числа всплесков наблюдаются как для разных суток, так и в пределах одних и тех же суток, но для разных пунктов наблюдения. Так, в период 27-29 октября скорость спада числа всплесков для УАС выше, чем для Сиовы. В то же

время 30 октября ее значения практически одинаковы в обоих наблюдательных пунктах. На рис. 2, е приведены полученные для суточных интервалов гистограммы числа всплесков с одинаковыми разностями амплитуд, регистрируемых на станциях “Академик Вернадский” и Сиова. Положительному смещению соответствует превышение амплитуды всплесков на УАС, отрицательному – на Сиове. Видно, что 27-28 октября наблюдался “перекося” распределения в сторону УАС, 30 октября – слабо выраженное смещение распределения в сторону Сиовы. 29 октября регистрировалась промежуточная форма распределения. Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что наряду с общим для обоих пунктов экспоненциальным характером спада количества всплесков с ростом пороговой амплитуды наблюдаются различия в скоростях спада и величинах амплитуд всплесков для разных пунктов и суток регистрации. Можно предположить, что указанное различие результатов от дня ко дню обусловлено изменениями активностей центров сверхмощных грозных разрядов, а для разных пунктов наблюдения – отличиями в расстояниях до наиболее активного в текущий момент центра.

Рис. 3 иллюстрирует пространственные распределения разрядов, восстановленные с использованием описанного выше алгоритма многопозиционной поляризационно-временной селекции. На рис. 3, а показаны положения источников всплесков с амплитудами более 15 пТл и соответствующие им гистограммы распределения числа источников по широте и долготе. На рис. 3, б изображены наиболее мощные события, амплитуда которых на УАС превысила 60 пТл. Видно, что источники группируются вблизи основных мировых грозных центров. Для исследуемого временного интервала наиболее активным оказывается Американский центр (50.4 % от всех всплесков мощнее 15 пТл), за ним следуют Африканский (26.6 %) и Азиатский (23 %). Из рис. 3, а видно, что УАС расположена ближе к

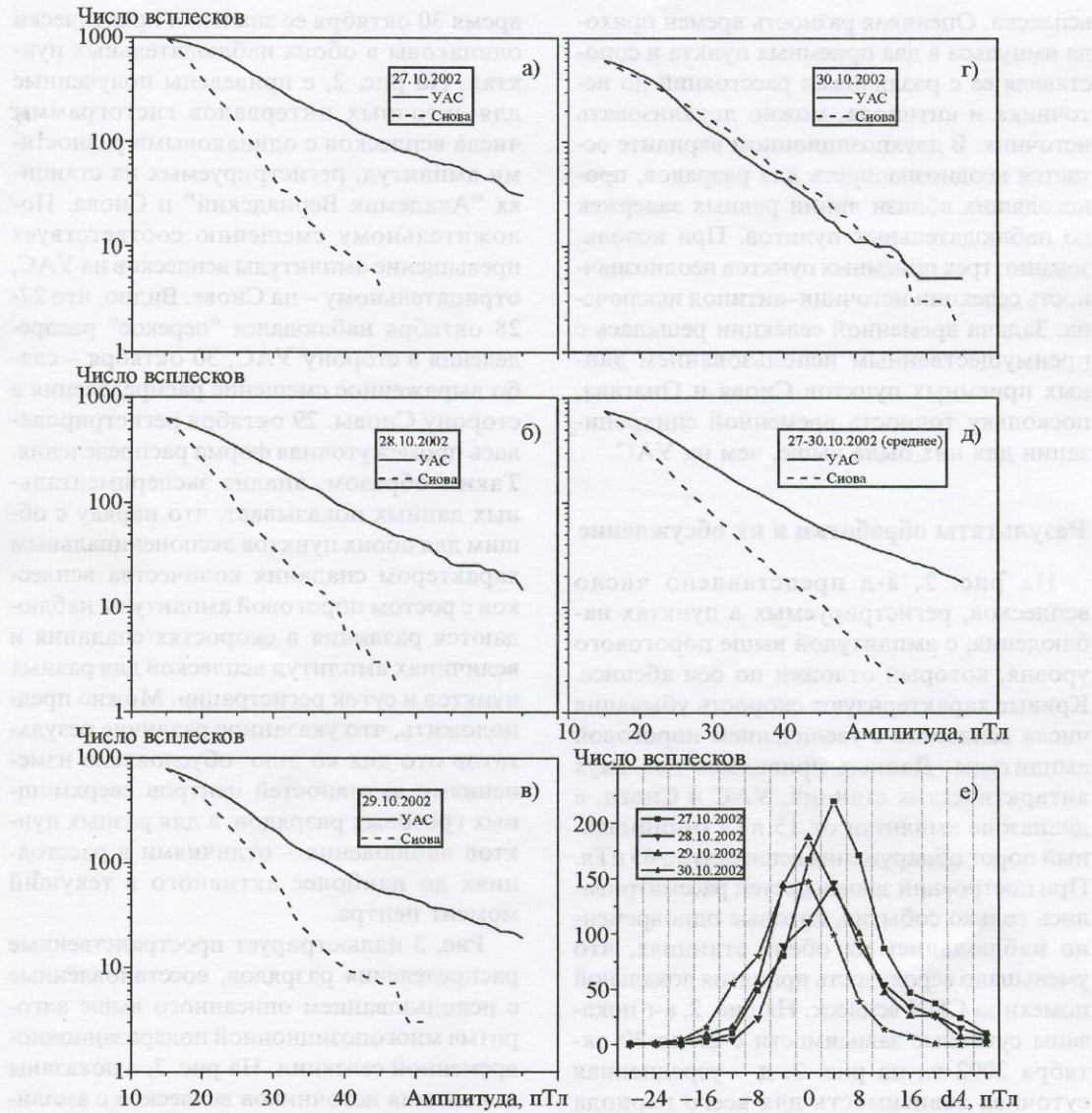


Рис. 2. Зависимость числа всплесков, регистрируемых на УАС и Сиове, от порогового уровня амплитуды: а) 27.10.2002; б) 28.10.2002; в) 29.10.2002; г) 30.10.2002; д) усредненные зависимости для 27-30.10.2002; е) гистограммы числа всплесков с одинаковой разностью амплитуд dA между УАС и Сиовой

наиболее активному Американскому центру. Это может быть одной из причин описанного ранее эффекта превышения средней амплитуды всплесков на УАС над соответствующей характеристикой для станции Сиова

(см. рис. 2). Поскольку наблюдения осуществлялись при переходе от летних к зимним для северного полушария условиям, заметно широтное смещение центров максимальной активности в южное полушарие [16, 25].

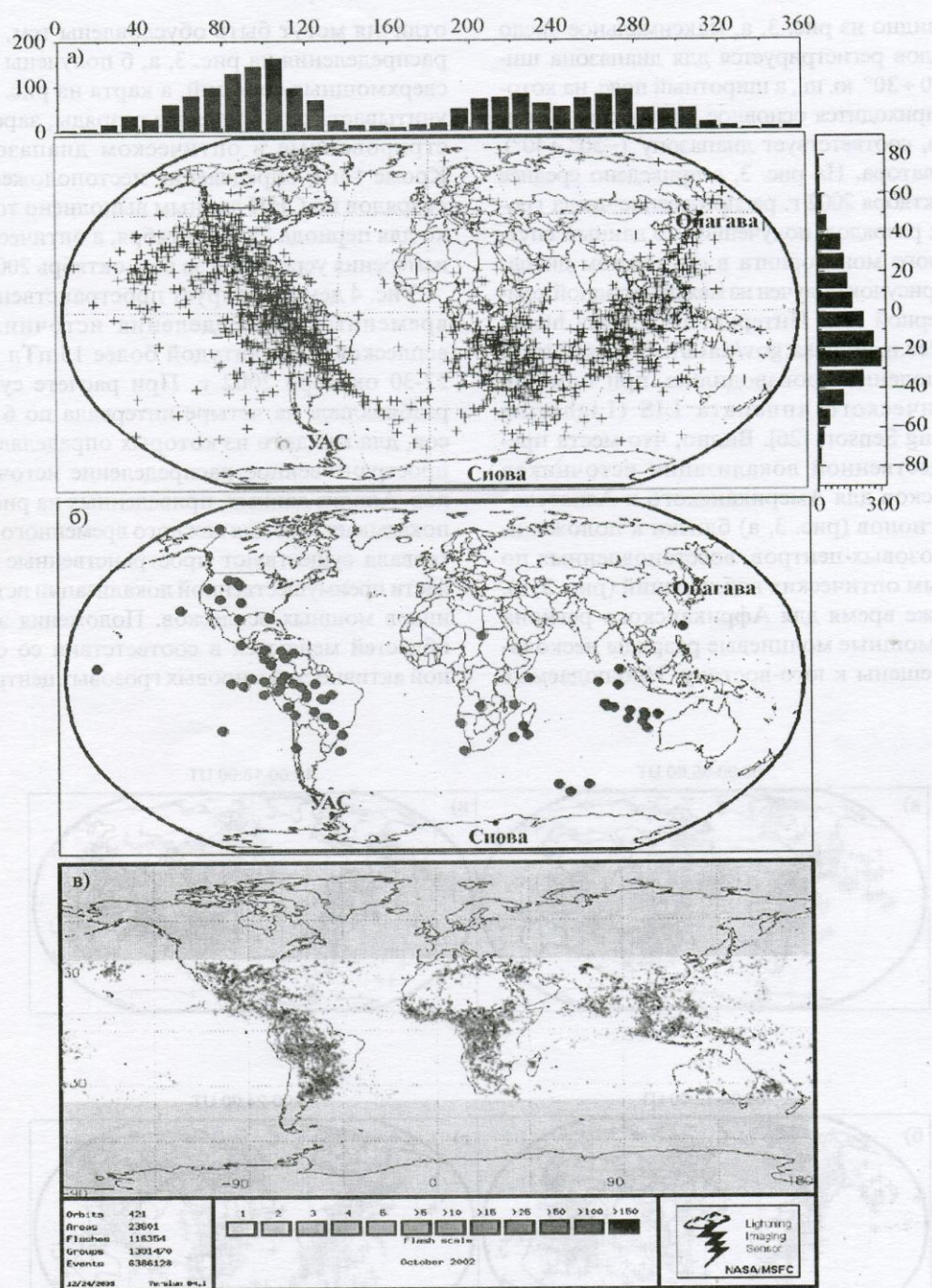


Рис. 3. Пространственные распределения молниевых разрядов: а) по данным СНЧ наблюдений 27-30 октября 2002 г. (всплески с амплитудой более 15 пТл); б) особо мощные события по данным СНЧ наблюдений 27-30 октября (зарегистрированные на УАС всплески с амплитудой более 60 пТл); в) спутниковые наблюдения в оптическом диапазоне, октябрь 2002 г., данные КА LIS (Lightning Imaging Sensor), рисунок получен из сети Интернет по адресу <http://thunder.msfc.nasa.gov/data/lisbrowse.html>

Как видно из рис. 3, а, максимальное число разрядов регистрируется для диапазона широт $20 \pm 30^\circ$ ю. ш., а широтный пояс, на который приходится основное количество источников, соответствует диапазону $(-50^\circ, +40^\circ)$ от экватора. На рис. 3, в приведено среднее для октября 2002 г. распределение числа грозных разрядов, полученное по данным спутникового мониторинга в оптическом диапазоне (рисунок получен из международной компьютерной сети Интернет по адресу <http://thunder.msfc.nasa.gov/data/lisbrowse.html>). Наблюдения производились при помощи космического аппарата LIS (Lightning Imaging Sensor) [26]. Видно, что места преимущественной локализации источников всплесков для Американского и Азиатского регионов (рис. 3, а) близки к положениям грозных центров, восстановленных по данным оптических наблюдений (рис. 3, в). В то же время для Африканского региона сверхмощные молниевые разряды несколько смещены к юго-востоку. Наблюдаемые

отличия могут быть обусловлены тем, что распределения на рис. 3, а, б получены для сверхмощных событий, а карта на рис. 3, в учитывает все молниевые разряды, зарегистрированные в оптическом диапазоне. Кроме того, определение местоположений разрядов по СНЧ данным выполнено только для периода 27-30 октября, а оптические измерения усреднены за весь октябрь 2002 г.

Рис. 4 демонстрирует пространственно-временные распределения источников всплесков с амплитудой более 15 пТл для 27-30 октября 2002 г. При расчете сутки разбивались на четыре интервала по 6 часов, для каждого из которых определялось пространственное распределение источников. Анализ данных, приведенных на рис. 4, показывает, что для каждого временного интервала существуют пространственные области преимущественной локализации источников мощных всплесков. Положения этих областей меняются в соответствии со сменной активностью мировых грозных центров.

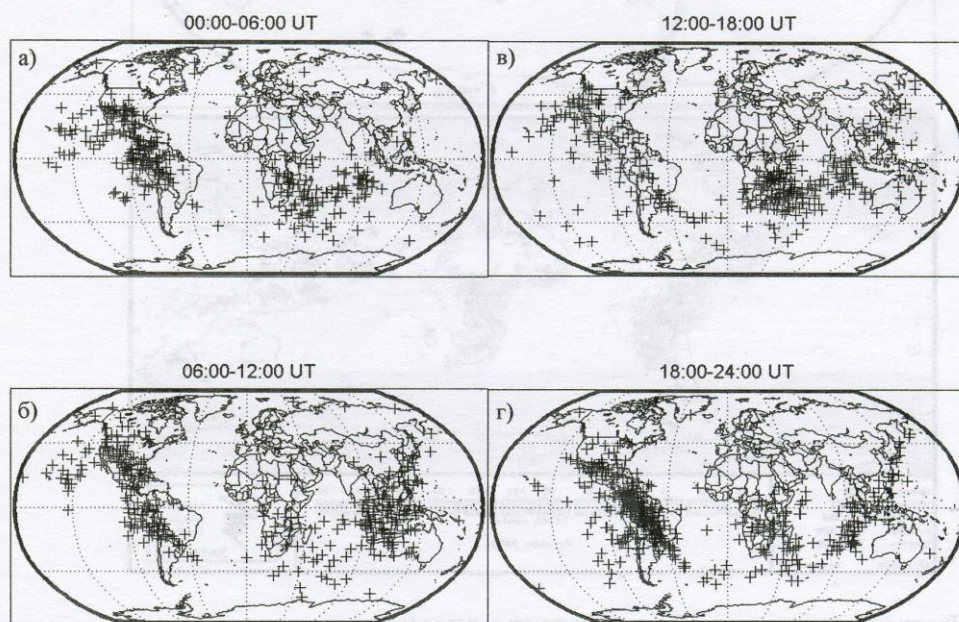


Рис. 4. Положения сверхмощных разрядов для 27-30 октября 2002 г., восстановленные для временных интервалов: а) 00:00–06:00 UT; б) 06:00–12:00 UT; в) 12:00–18:00 UT; г) 18:00–24:00 UT

Так, число разрядов максимально в Азиатском регионе с 6:00 UT до 12:00 UT (рис. 4, б), в Африканском с 12:00 UT до 18:00 UT (рис. 4, в) и в Американском с 18:00 UT до 24:00 UT (рис. 4, г). С 0:00 UT до 6:00 UT (рис. 4, а), когда ни один из мировых грозных центров не находится в максимуме активности, источники всплесков формируют несколько областей. Основным остается Американский регион, как следствие кульминации активности этого грозного центра вблизи 21:00 UT. Кроме того, разряды наблюдаются на юге, юго-востоке Африки и к юго-западу от Азиатского грозного центра. Несмотря на наличие для каждого временного интервала основного источника сверхмощных разрядов, они регистрируются и вблизи двух других мировых грозных центров. Наблюдается также небольшое количество событий, удаленных от основных центров грозной активности. Среди других особенностей расположения источников всплесков можно отметить широтное смещение активных зон в Азиатском и Африканском регионах к югу от экватора. В Американском регионе наблюдаются две активные зоны – более мощная в Южной и менее мощная в Северной Америке. Отметим, что сходная география активных областей присутствует в картах, полученных в оптическом диапазоне (см. рис. 3, в). Таким образом, можно заключить, что пространственные положения и временной ход активностей мощных грозных разрядов в целом повторяют соответствующие характеристики средней грозной активности.

Оценим теперь величину “кажущегося” смещения координат источников всплесков, обусловленного гиротропией резонатора Земля–ионосфера. Как указывалось выше, смещение $\Delta\varphi(f)$ связано с коэффициентом эллиптичности $r_j(f)$ соотношением (6). Расчеты $\Delta\varphi$ на частоте первой моды ШР показали, что для 27-30 октября 2002 г. среднее значение смещения $\langle\Delta\varphi\rangle=15.4^\circ$, а его среднеквадратичное отклонение $\sigma_{\Delta\varphi}=2.7^\circ$. Для широтного пояса $(-50^\circ,+40^\circ)$ от экватора, куда попадает большинство источников всплесков (см., рис. 3, а), это соответ-

ствует линейному смещению источника на $1100+1700$ км. Данная величина превышает оценку погрешности определения координат $\Delta D\sim 1100$ км, следовательно, смещение достоверно и должно учитываться при восстановлении координат источников сверхмощных молниевых разрядов.

Выводы

1. На УАС “Академик Вернадский”, начиная с мая 2001 г., организован непрерывный мониторинг СНЧ сигналов в диапазоне шумановских резонансов. Непосредственно на станции проводится определение поляризационной структуры СНЧ полей.
2. Разработана методика определения координат сверхмощных молниевых разрядов с учетом гиротропии, вызванной магнитным полем Земли. Методика основана на асимптотической теории гиротропного резонатора Земля–ионосфера. Местоположение разрядов оценивалось по поляризационным характеристикам и временам прихода переднего фронта СНЧ всплеска, измеренным в пространственно разнесенных приемных пунктах. Анализ экспериментальных данных показал, что предсказанное теоретически систематическое смещение положений источников всплесков к западу, вызванное гиротропией, достигает для первой моды ШР величины порядка 15.4° и должно учитываться при определении координат.
3. Получены распределения скоростей спада количества СНЧ всплесков в зависимости от амплитуды. Показано, что количество всплесков экспоненциально уменьшается с ростом их амплитуды. В то же время скорости спада и величины наблюдаемых амплитуд различны для разных пунктов наблюдения и суточных записей.
4. Выполнено сопоставление пространственных и временных распределений сверхмощных разрядов со средней грозной активностью. Показано, что для временного интервала 27-30 октября 2002 г. пространственные распределения сверхмощных событий и средней грозной ак-

тивности сходны. Большинство сверхмощных разрядов происходит в районах локализации мировых грозových центров. Максимальное число СНЧ всплесков для каждого из этих центров регистрируется в предзаходные часы местного времени.

Мониторинг СНЧ сигналов на станции “Академик Вернадский” осуществлялся авторами настоящей работы во время 6-й и 7-й Украинских антарктических экспедиций. Измерения обеспечивались Украинским антарктическим центром и проводились в рамках Государственной программы антарктических исследований по научному направлению “Физика верхней атмосферы и ближнего космоса”. Работа выполнена при частичной поддержке УНТЦ в рамках партнерского проекта №Р-072 и МОН Украины по договору 2М/118-98. Данные наблюдений СНЧ полей на японской станции Сиова в Антарктиде и магнитной обсерватории Онагава в Японии любезно предоставлены коллегами из Отделения геофизики университета Тохоку (Япония). Считаю необходимым отметить вклад разработчиков приемной аппаратуры в РИ НАНУ – В. Е. Пазнухова и А. Г. Рохмана, а также в ЛЦ ИКИ НАНУ-НКАУ – В. Е. Корепанова, А. Е. Сухинюка и П. Р. Мальцева. Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить директора УАЦ В. А. Литвинова и зам. директора УАЦ Г. П. Миленевского за поддержку этих исследований, а также сотрудников РИ НАНУ В. Г. Галушко и В. Г. Синицына за полезные обсуждения и ряд ценных замечаний. Мы признательны Умрану Инану (Станфордский университет, США) и Кейту Гровсу (Исследовательская лаборатория ВВС, США) за плодотворные дискуссии о дальнейших перспективах этих исследований.

Литература

1. W. O. Schumann. *Naturforsch.* 1952, 7a, pp. 149-154.
2. M. Balser, C. A. Wagner. *Nature.* 1960, 188, pp. 638-641.
3. E. R. Williams. *Science.* 1992, 256, pp. 1184-1187.
4. C. Price, M. Asfur. *Proceedings of XXVIIth General Assembly of URSI, Maastricht, the Netherlands 17-24 August 2002.* E4.P.7. pp. 1146-1149.
5. L. G. Smith. *Handbook of Geophysics.* Macmillan, New York, 1961, 456 pp.
6. T. Ogawa, Y. Tanaka, T. Miura, and M. Yasuhara. *J. Geomagn. Geoelec.* 1966, 18, pp. 443-454.
7. D. J. Vocippio, E. R. Williams, S. J. Heckman, W. A. Lyons, I. T. Baker, R. Boldi. *Science.* 1995, 269, pp. 1088-1091.
8. M. Füllecrug, S. C. Reising. *Geophys. Res. Lett.* 1998, 22, pp. 4145-4148.
9. П. В. Блиох, А. П. Николаенко, Ю. Ф. Филиппов. *Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера.* Киев, Наукова Думка, 1977, 199 с.
10. W. A. Lyons, J. Geophys. Res. 1996, 101, pp. 29,641-29,652.
11. S. A. Cummer, U. S. Inan. *Geophys. Res. Lett.* 1997, 24, pp. 1731-1734.
12. S. A. Cummer, U. S. Inan, T. F. Bell, and C. P. Barrington-Leigh. *Geophys. Res. Lett.* 1998, 25, pp. 1281-1284.
13. S. A. Cummer, M. Stanley. *Geophys. Res. Lett.* 1999, 26, pp. 3205-3208.
14. C. Price, M. Asfur, W. Lyons, T. Nelson. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29, 1031, doi:10.1029/2001GL013519.
15. M. Sato, H. Fukunishi, M. Kikuchi, H. Yamagishi, and W. A. Lyons. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2003, 65, pp. 607-614.
16. M. Sato, H. Fukunishi. *Geophys. Res. Lett.* 2003, 30, pp. 1859-1862.
17. M. Füllecrug, and S. Constable. *Geophys. Res. Lett.* 2000, 27, pp. 333-336.
18. В. Г. Безродный, О. В. Буданов, А. В. Колосков, Ю. М. Ямпольский. *Космічна наука і технологія.* 2003, 9, №5/6, с. 117-123.
19. В. Г. Безродный. *Радиофизика и Радиоастрономия.* 2004, 9, №4, с. 375-390.
20. Б. В. Лазебный, А. П. Николаенко, В. Е. Пазнухов. *Тезисы докладов Всесоюзной конференции “Прием сверхнизкочастотных колебаний и устройства для их обработки”, Воронеж, 15-17 февраля 1983,* с. 44-45.
21. В. Г. Галушко, О. В. Буданов, Ю. М. Ямпольский. *Радиофизика и Радиоастрономия.* 2003, 8, №4, с. 393-402.
22. М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики.* Москва, Наука, 1970, 855 с.
23. D. D. Sentman. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1989, 51, pp. 507-519.
24. А. П. Николаенко, Л. М. Рабинович, А. В. Швец, А. Ю. Щекотов. *Известия вузов. Радиофизика.* 2004, 47, №4, с. 267-291.

25. A. P. Nickolaenko, G. Satori, B. Zieger, L. M. Rabinowicz, and I. G. Kudintseva. J. Atmos. Terr. Phys. 1998, **60**, pp. 387-399.
26. H. J. Christian, R. J. Blakeslee, S. J. Goodman, D. A. Mach, M. F. Stewart, D. E. Buechler, W. J. Koshak, J. M. Hall, W. L. Boeck, K. T. Driscoll, and D. J. Bocippio. Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Guntersville, Alabama, June 7-11, 1999, pp. 746-749.

Location of Superpowerful Lightning Flashes through Polarization Magnetic Measurements in Schumann Resonance Waveband

A. V. Koloskov, O. V. Budanov, V. G. Bezrodny, and Yu. M. Yampolski

A technique of locating the high-power lightning flashes through polarization magnetic measurements in the ELF waveband of (3 ÷ 300 Hz) is proposed. Polarization characteristics and times of arrival of the ELF bursts measured at spaced points are used to reconstruct the locations of these flash sources. Corrections to the bearing toward the source are introduced, arising from the gyrotropy of the Earth-ionosphere resonant cavity. The observational data were collected by the authors at the Ukrainian Antarctic Station Akademik Vernadsky. The ELF data from the Japanese Syowa station in Antarctica and the Onagawa observatory in Japan have been used as well. The location technique has been applied to reconstruct the coordinates of flashes recorded from 27 till 30 October, 2002. The spatial and time-and-space distributions of the high-power lightning flashes have been compared with the data of optical monitoring from a satellite known from Internet.