

УДК 551.590.21

ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА НА ГЛОБАЛЬНУЮ ГРОЗОВУЮ АКТИВНОСТЬ И ПОГОДУ НА ЗЕМЛЕ

В. И. Ермаков¹, Ю. И. Стожков

В результате анализа многолетних данных об изменениях напряженности электрического поля в атмосфере на высокогорных станциях (высота (3 км)), которые характеризуют грозовую активность в глобальном масштабе, ранее было показано, что после прохождения активной области через центральный меридиан Солнца примерно через двое суток глобальная грозовая активность на Земле максимальна. В этот же период наблюдаются максимальные изменения погоды, связанные с ливнями, штормами, ураганами и др. В работе сделан вывод о том, что влияние активной области на грозовую активность, а через нее и на погоду, осуществляется через исходящий из этой области высокоскоростной солнечный ветер. Активная область сначала появляется на краю диска Солнца, поэтому имеется возможность учета влияния этой области при краткосрочном (на несколько суток) прогнозировании изменений погоды. Большие активные области существуют в течение нескольких оборотов Солнца, поэтому имеется возможность учета солнечной активности при долгосрочном прогнозировании изменений погоды.

¹Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета. 141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, д. 3.

Грозное облако образуется при наличии достаточно сильного восходящего потока теплого влажного ионизованного воздуха из приземного слоя атмосферы. В этом слое воздух ионизируют космические лучи и радиоактивные элементы. В восходящем потоке воздуха присутствуют положительно и отрицательно заряженные ядра конденсации водяного пара (зародыши водяных капель). При подъеме воздух охлаждается и его относительная влажность растет. Как только находящийся в воздухе пар становится пересыщенным, начинается процесс его конденсации и образования капель. Конденсация пара на отрицательно заряженных ядрах начинается при меньших пересыщениях пара, чем на положительно заряженных. Поэтому в нижней части зарождающегося облака появляются отрицательно заряженные капельки, а в верхней части – положительно заряженные. В результате происходит макромасштабное пространственное разделение разноименных зарядов. Как только напряженность электрического поля в облаке достигает значений $2 - 3 \text{ кВ/см}$, в нем появляются молниевые разряды. Их инициируют широкие атмосферные ливни (ШАЛ), образуемые космическими частицами сверхвысоких энергий ($\epsilon \geq 10^{14} \text{ эВ}$). В сильно разветвленных и сильно ионизованных каналах молний появляется много новых заряженных ядер. Это приводит к усилению процесса конденсации пара, выделению скрытой теплоты и, соответственно, к усилению восходящих потоков. Электрическая активность и влагосодержание облака постепенно растут. С течением времени капли вырастают настолько, что начинают падать вниз. Это приводит к появлению осадков и распаду облака [1 – 3]. К вершине облака из верхней атмосферы течет ток. Этот ток (включающий в себя электроны, высыпавшиеся из ионосферы и магнитосферы) обусловлен электрическим полем облака. В свою очередь этот ток является причиной увеличения электрической активности (и влагосодержания) облака. Величина указанного тока тем больше, чем выше степень ионизации столба воздуха, находящегося над грозным облаком.

Из наблюдений известно, что основными ионизаторами воздуха в тропо- и стратосфере являются космические лучи, в ионосфере – ультрафиолетовое (УФ) и рентгеновское (X) излучения Солнца. Основным поставщиком протонов и электронов в магнитосферу Земли является солнечный ветер. Потоки указанных излучений испытывают существенные изменения во времени. Наиболее сильно они зависят от солнечной активности, при усилении которой они увеличиваются во много раз [4].

Настоящая работа посвящена изучению влияния активных областей Солнца (они управляют потоками ионизирующих атмосферу излучений) на глобальную грозную активность и погоду на Земле.

Исходные данные. В соответствии с механизмом образования грозовых облаков [1 – 3] и многолетними наблюдениями за грозами в разных точках земного шара глобальную грозовую активность могут характеризовать данные об изменениях напряженности электрического поля E в атмосфере вблизи поверхности Земли. Это поле образуется находящимся в поверхностном слое Земли отрицательным электрическим зарядом, который переносится нисходящими молниями из грозовых облаков.

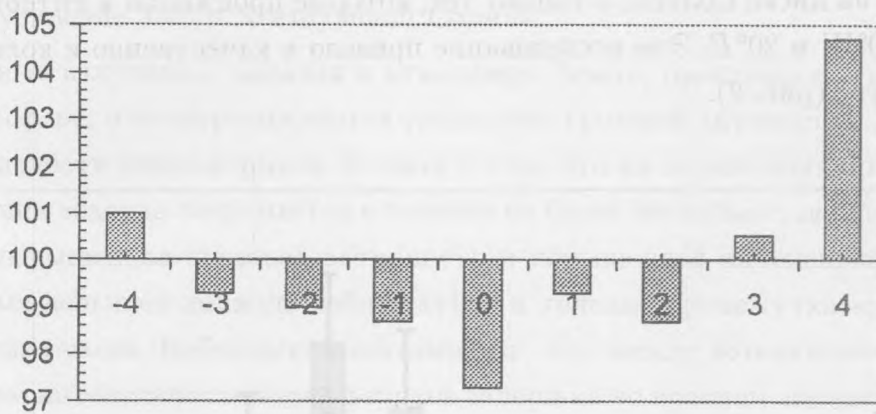


Рис. 1. Относительные изменения напряженности электрического поля E на станции Цугшпитце до, во время и после солнечных вспышек балла ≥ 2 (в линии H_{α}). Обработка проведена методом наложения эпох по 70 событиям. Используются данные наблюдений с 1954 по 1959 гг. в дни с исключительно ясной погодой. Нулевой день соответствует моменту появления вспышки. Отбор солнечных вспышек в зависимости от их гелиографических координат не проводился [5].

Для получения репрезентативных в глобальном масштабе данных о вариациях E Р. Рейтер [5, 6] использовал результаты измерений E на высокогорных станциях Цугшпитце и Вэнк-Пик, находящихся над слоем перемешивания атмосферы на высотах ~ 3 км. Для этих станций 50 – 70% электрического сопротивления воздушного столба находится ниже их высотного уровня. Измерения проводились с 1954 по 1981 гг. в периоды увеличения и максимумов солнечной активности в 11-летних циклах. Ввиду большой частоты вспышек в эти периоды для анализа солнечно-земной связи выбирались результаты измерений лишь в дни с совершенно ясной погодой, в которые были, по крайней мере, две вспышки класса ≥ 2 .

Первые результаты наблюдений за изменениями E на станции Цугшпитце, обработанные методом наложенных эпох относительно моментов солнечных вспышек в линии

H_α , представлены на рис. 1 [5].

Из рис. 1 видно, что в интервале от -4 до $+4$ суток, считая от дня вспышки (нулевой день), амплитуды вариаций E в целом незначительны и в среднем $< 2\%$, что находится в пределах погрешности измерений.

Подобное исследование было повторено Р. Рейтером позже в периоды времени с 1967 по 1971 гг. и с 1977 по 1981 гг. (всего было рассмотрено 125 случаев) [6]. Основное отличие повторного исследования заключалось в использовании не всех вспышек класса ≥ 2 , наблюдавшихся на диске Солнца, а только тех, которые произошли в интервале гелиодолгот между $20^\circ W$ и $20^\circ E$. Это исследование привело к качественно и количественно новому результату (рис. 2).

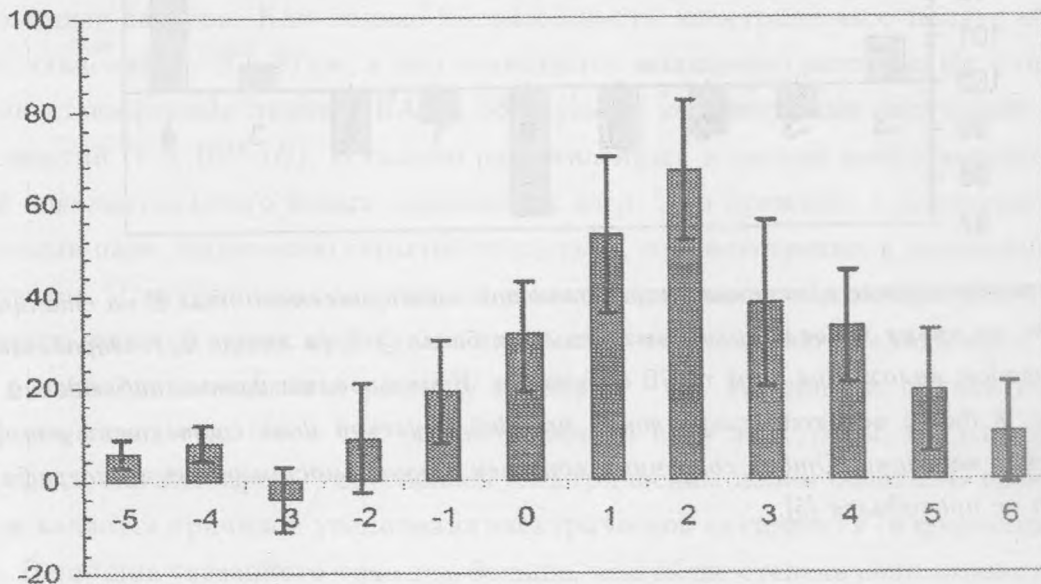


Рис. 2. Относительные изменения напряженности электрического поля E на станции Цукшпитце до, во время и после солнечных вспышек балла ≥ 2 , произошедших в интервале гелиодолгот между $20^\circ W$ и $20^\circ E$. Обработка данных проведена методом наложения эпох по 125 событиям. Наблюдения охватывают периоды 1967–1971 и 1977–1981 гг. Нулевой день соответствует моменту появления вспышки. Вертикальные отрезки показывают среднеквадратичные отклонения [6].

Как видно из рис. 2, максимум E наблюдался на второй день после вспышки, а увеличение E составило 64%. Представленная на рис. 2 зависимость E в интервале от -5 до $+6$ суток, считая от дня вспышки, означает, что в глобальном масштабе грозовая активность возрастает на $\sim 60\%$ и достигает своего максимального значения примерно

через двое суток после вспышки на Солнце. Рост грозовой активности начинается за (2 – 3) суток до момента наблюдения максимума E . В течение (2 – 3) дней после максимума происходит спад грозовой активности. Ниже изложено объяснение полученного результата.

Вспышки на Солнце и грозовая активность. Продолжительность вспышек на Солнце (вспышек в H_α и мягком рентгеновском излучении) лежит в пределах от нескольких минут до нескольких часов [7]. В течение этого промежутка времени наблюдается многократное усиление УФ- и X-излучений Солнца.

Указанные излучения, попадая в атмосферу Земли, производят усиленную ионизацию в ионосфере, что сопровождается усилением грозовой активности и, соответственно, интенсивности атмосфериков. В связи с тем, что из-за рекомбинации ионов усиленная ионизация воздуха сохраняется в течение не более нескольких десятков минут после вспышки, повышенная грозовая активность и повышенная интенсивность атмосфериков во время вспышек должны наблюдаться в течение промежутка времени не более, чем несколько часов. Наблюдения показывают, что между возникновением вспышки и увеличением интенсивности атмосфериков задержка во времени порядка десятка минут [8]. Это значит, что во время вспышки усиление грозовой активности и интенсивности атмосфериков происходит под действием усиленного электромагнитного (а не корпускулярного) излучения Солнца. Продолжительность повышенной грозовой активности во время вспышки примерно равна длительности вспышки и не превышает нескольких часов. Однако, согласно рис. 2, повышенная грозовая активность наблюдается и в течение нескольких суток.

Активные области на Солнце, солнечный ветер и грозовая активность. Известно, что вспышки тесно связаны с активными областями на Солнце и происходят в основном в молодых и развитых активных областях [9]. Поэтому для объяснения результатов, полученных Р. Рейтером и представленных на рис. 2, следует рассматривать не только сами вспышки на Солнце, но и активные области, внутри которых они происходили.

Из рис. 2 видно, что максимум грозовой активности наблюдается через ~ 2 дня после вспышки. Если бы на грозовую активность влияло только электромагнитное излучение Солнца, то трудно было бы ожидать такой большой задержки во времени (время распространения электромагнитного излучения от Солнца до Земли около 8 минут). Это значит, что на грозовую активность влияет не только усиленное электромагнитное излучение Солнца от солнечных вспышек, но и корпускулярное излучение из активной области, которое распространяется от Солнца со скоростью $V = R/t \approx 900$ км/с, где

R – расстояние от Солнца до Земли и t – время распространения излучения, равное 2 суткам. Найденная величина V указывает на то, что вариации E , представленные на рис. 2, могут быть обусловлены корпускулярным излучением, а точнее солнечным ветром, исходящим из активной области Солнца.

Обычно различают три вида солнечного ветра: спокойный – скорость на орбите Земли 300 – 400 км/с; связанный с хромосферными вспышками (активными областями на Солнце) – скорость может достигать 1000 км/с и более; связанный с корональными дырами на Солнце – скорость достигает 700 – 800 км/с [10]. Найденное значение V соответствует высокоскоростному солнечному ветру, исходящему из активной области Солнца, где наблюдаются вспышки.

Известно, что уходящий из активной области поток высокоскоростного солнечного ветра W в сечении плоскостью имеет в полярных координатах (r, θ, φ) диаграмму направленности $W(\theta, \varphi)$ в виде лепестка, ширина которого порядка 90° [11]. Поэтому, если увеличение E связано с высокоскоростным солнечным ветром от активной области, то зависимость E от угла вращения Солнца φ (этот угол определяется скоростью вращения Солнца, которая постоянна и равна $13.2^\circ/\text{сутки}$) должна также иметь вид лепестка. Как оказалось, построенная в соответствии с рис. 2 диаграмма $E(\theta, \varphi)$ соответствует форме лепестка, ширина которого $\sim 70^\circ$.

Представленную на рис. 2 зависимость Р. Рейтер не мог получить в случае, когда он рассматривал все вспышки, которые наблюдались на диске Солнца на разных гелиографических широтах и долготах и находились в разных активных областях (рис. 1). Максимумы диаграмм направленности этих областей в целом были направлены не в сторону Земли. Влияние активной области на грозовую активность максимально, если эта область находится на низких гелиоширотах вблизи центрального меридиана Солнца. Если же она находится в других областях диска Солнца, то ее влияние на грозовую активность и, соответственно, на величину E значительно ослаблено. Этим можно объяснить тот факт, что обнаруженные в период с 1954 по 1959 гг. изменения электрического поля (рис. 1) в среднем были $< 2\%$ [5]. Р. Рейтеру удалось выделить однозначно определенный эффект лишь в том случае, когда он сконцентрировал данные о вспышках, происшедших между $20^\circ E$ и $20^\circ W$, т.е. данные, соответствующие прохождению активной области через центральный меридиан Солнца (рис. 2).

Кроме того известно, что с высокоскоростными потоками также связана секторная структура магнитных полей в солнечном ветре. На второй день после пересечения границы сектора интенсивность магнитного поля и скорость солнечного ветра дости-

гает максимума, возрастает геомагнитная возмущенность. За оборот Солнца могут наблюдаться два или более секторов, сопровождающиеся высокоскоростными потоками солнечного ветра [10]. Эти потоки также могут влиять на грозовую активность.

Кроме тех результатов, которые представлены на рис. 1 и 2, имеются другие результаты, полученные Р. Рейтером на станции Цугшпитце. Они показывают, что максимум напряженности электрического поля E наблюдался на вторые сутки после пересечения границы секторов (переход из отрицательного сектора в положительный $-/+$). При этом увеличение E достигало 20% [6]. Эти результаты свидетельствуют о возрастании глобальной грозовой активности после пересечения границ секторов. Наиболее вероятная причина этого возрастания также связана с высокоскоростным солнечным ветром.

Таким образом, в результате анализа данных, полученных в [5, 6], можно сделать следующее заключение. На глобальную грозовую активность на Земле влияют активные области, находящиеся на Солнце. Это влияние осуществляется через исходящий из них высокоскоростной поток солнечного ветра. В связи с тем, что диаграмма направленности этого потока имеет вид лепестка, а скорость его распространения около 1000 км/с, грозовая активность максимальна примерно через 2 суток после прохождения активной области через центральный меридиан Солнца, когда поток достигает Земли. На грозовую активность влияют также электромагнитные X- и УФ-излучения вспышки, однако это влияние непродолжительно по времени.

Высыпание электронов из магнитосферы под действием гроз. Высокоскоростной солнечный ветер проникает на большие глубины в магнитосферу и является главным поставщиком в нижнюю магнитосферу заряженных частиц (электронов и протонов). Чем выше скорость и концентрация частиц этого ветра, тем выше там концентрация электронов и протонов. Из-за наличия геомагнитного поля проникнуть из нижней магнитосферы в ионосферу и далее в стратосферу частицы солнечного ветра при отсутствии внешнего электрического поля не могут. В то же время наблюдения, проведенные с помощью спутников, ракет и наземных технических средств, указывают на то, что высыпание электронов из магнитосферы в ионосферу и далее к вершинам грозовых облаков в действительности наблюдается.

Во время полетов орбитальной станции "Мир", которые происходили на высотах порядка нескольких сотен км, были зарегистрированы высыпающиеся из нижней магнитосферы в ионосферу электроны с энергиями в несколько десятков и даже сотен кэВ. Эти электроны наблюдались при пролетах станции в области геомагнитного экватора и низких широт в районах грозовых очагов [12]. Как известно, распределение наиболь-

шей плотности молниевых разрядов в течение года отмечается в тропических широтах и наблюдается над континентами в этих трех грозовых очагах (Азиатский (Индокитайский), Африканский и Американский (Центральная Америка и северная часть Южной Америки)).

Проведенные наблюдения свидетельствуют о том, что квазипостоянное и низкочастотное переменное электрические поля от находящихся в очагах грозовых облаков проникают в магнитосферу. Под действием этих полей из нижней части магнитосферы в ионосферу высыпаются электроны, которые затем движутся к вершинам грозовых облаков.

Высыпания электронов происходят потому, что в грозовых очагах находятся нескомпенсированные положительные заряды. Геометрический размер такого заряда примерно равен радиусу грозового очага, т.е. порядка 2000 км. Создаваемое зарядом электрическое поле проникает на магнитосферные высоты.

Образование нескомпенсированного квазистационарного положительного заряда над грозовым очагом можно объяснить следующим образом. В глобальных масштабах Земля вместе с ее атмосферой имеет близкий к нулю электрический заряд. В то же время в локальных масштабах на Земле могут присутствовать избыточные заряды одного знака. Из грозовых очагов, внутри которых во время молниевых разрядов образуются большие количества разноименных зарядов, молнии переносят на поверхность Земли преимущественно отрицательный заряд. В связи с тем, что Земля имеет достаточно высокую электропроводность, он за короткое время растекается по всей ее поверхности. При этом положительный заряд, оставшийся в грозовых облаках, течет от их вершин в ионосферу и далее из ионосферы к поверхности Земли. Из-за достаточно низкой электропроводности атмосферы над вершиной грозовых облаков плотность этого заряда в районах грозовых очагов значительно выше, чем плотность отрицательного заряда в поверхностном слое Земли. Поэтому над грозовыми облаками образуются избыточные положительные заряды. Величина этих зарядов зависит от грозовой активности и от степени ионизации атмосферы [13 – 14].

Известны результаты измерений напряженности электрического поля E_m в магнитосфере, проведенные на спутнике ISEE-1 [15]. Эти измерения показали, что на дневной стороне, когда грозовая активность максимальна, вблизи магнитопаузы наблюдаются сильные импульсные электрические поля с напряженностью до 10 – 15 мВ/м. Механизм непосредственного влияния Солнца на E_m неизвестен. Наиболее вероятно, что источником наблюдаемых полей были грозовые облака, потому что грозовая актив-

ность максимальна на дневной стороне.

Под действием положительного заряда грозового очага электроны высыпаются из магнитосферы и из ионосферы, что приводит к уменьшению концентрации электронов и в магнитосфере и в ионосфере. К сожалению, наблюдения за вариациями концентраций электронов в магнитосфере над грозовыми очагами отсутствуют. В то же время наблюдения за ионосферой показывают, что высотное распределение максимума электронной концентрации в слое $F2$ имеет выраженную впадину, середина которой находится на магнитном экваторе, а максимум (гребни) вокруг нее располагаются на широтах от 15 до 20° к северу и к югу [16]. Наличие этой впадины можно объяснить тем, что грозы, интенсивность которых максимальна в тропических широтах, вызывают высыпания электронов из $F2$ -области в D -область. Как известно, около 70% всех гроз "гремит" в тропических широтах.

О высыпании электронов из магнитосферы свидетельствует также появление на низких магнитных широтах на высотах ($300 - 500$) км относительно яркой красной "тропической дуги". Основной причиной свечения считают возбуждение молекул кислорода электронами, ускоряемыми электрическими полями [16].

Имеются другие наблюдения, свидетельствующие в пользу того, что грозовые облака высыпают электроны из $F2$ -области. Наблюдения на мировой сети ионосферных станций показали наличие противофазной унитарной вариации критической частоты $f_0 F2$ -слоя и грозовой активности [17]. Это значит, что при максимуме грозовой активности наблюдается минимум концентрации электронов в $F2$ -слое, что можно объяснить высыпанием электронов из этого слоя.

Над грозовыми облаками в D -области ионосферы имеют место повышенные концентрации электронов [18]. Этот факт можно объяснить тем, что высыпающиеся из магнитосферы и верхней ионосферы электроны эффективно тормозятся в D -области, где наблюдается повышенная плотность воздуха, и при торможении производят дополнительную ионизацию D -области.

В последнее время со спутника "Космос-1809", который летал на высоте ≈ 950 км, было обнаружено, что в районах зарождения и развития тропических штормов и тайфунов наблюдались аномально высокие значения (до ~ 20 мВ/м) квазистационарного электрического поля E , т.е. меры грозовой активности (в нормальных условиях $E \ll 1$ мВ/м) [20].

Известны также другие наблюдения, свидетельствующие о высыпании электронов из магнитосферы под действием гроз [20 - 21].

При высыпании электронов из магнитосферы к вершинам грозовых облаков течет электрический ток, увеличивающий грозовую активность. Величина тока, текущего из магнитосферы к вершинам грозовых облаков тем больше, чем выше концентрация электронов и ионов в магнитосфере, ионосфере и стратосфере в столбах воздуха, находящихся над вершинами грозовых облаков.

Основные ионизаторы атмосферы. Концентрация электронов и ионов в магнитосфере зависит, главным образом, от скорости (и менее от плотности) солнечного ветра, проникающего в магнитосферу. Чем выше его скорость, тем глубже он проникает в магнитосферу, тем выше концентрация электронов в нижней магнитосфере, тем больше ток, текущий из магнитосферы к вершинам грозовых облаков и тем выше грозовая активность.

Концентрация электронов и ионов в ионосфере зависит, главным образом, от ионизирующих воздух ультрафиолетового (УФ) и рентгеновского (X) излучений Солнца. Эти излучения сильно (на порядки) возрастают во время вспышек на Солнце. Они достигают максимальных значений в периоды максимумов 11-летних циклов солнечной активности. Указанные излучения Солнца проникают в атмосферу на максимальную глубину в экваториальных широтах. Поэтому их влияние на грозовую активность наиболее значительно в области тропических широт.

Концентрация ионов в стратосфере (высоты от ~ 10 до ~ 50 км) зависит, главным образом, от интенсивности $I_{кл}$ первичных и вторичных космических лучей (ГКЛ), которые ионизуют воздух. Из-за наличия у Земли магнитного поля эта интенсивность максимальна в области геомагнитных полюсов и минимальна в области геомагнитного экватора (тропические широты). С течением времени значения $I_{кл}$ изменяются на разных географических широтах по-разному [22].

В приземном слое атмосферы наиболее сильная ионизация воздуха наблюдается в горных районах, т.к. там в воздухе присутствует избыточное содержание радона и радиоактивных продуктов его распада. По этой причине грозовая активность в горах, как правило, выше, чем в других районах.

Из вышеизложенного следует, что грозовая активность не может быть одинаковой в разных географических районах земного шара. Она должна зависеть как от наличия активных областей и корональных дыр на Солнце (т.е. от наличия высокоскоростного солнечного ветра), от их расположения относительно центрального меридиана Солнца, от вспышек на Солнце, от временных вариаций галактических космических лучей, так и от географических особенностей местности и от сезона года.

Влияние активных областей Солнца на погоду на Земле. Во время гроз выделяется большое количество скрытой теплоты, наблюдаются мощные воздушные потоки и выливаются ливневые осадки. Поэтому с грозами часто связаны ливни, штормы, ураганы и другие аномальные изменения погоды.

Как было показано выше, через ~ 2 суток после прохождения активной области через центральный меридиан Солнца в регионах грозových очагов должны наблюдаться существенные изменения погоды. С течением времени эти изменения погоды могут переноситься в другие регионы земного шара. Ниже приведены доказательства, свидетельствующие о том, что указанные изменения должны наблюдаться и в действительности наблюдаются.

Энергию, выделяемую в атмосфере при формировании грозových облаков, можно оценить следующим образом. Электрическая мощность одного грозového облака ($10^8 - 10^9$) Вт. Она рассчитывается по току, текущему через облако, и напряжению между вершиной и основанием облака. Величина тока, текущего между ионосферой и облаком, измерялась на специально оборудованном самолете В-29 [13] и на аэростатах [23]. Измерения показали, что среднее значение этого тока ~ 1 А. Расчетное значение напряжения между вершиной и основанием облака ($10^8 - 10^9$) В [24]. На Земле одновременно "гремит" около 2000 гроз [24 - 25]. Поэтому суммарная электрическая мощность гроз в глобальном масштабе равна ($2 \cdot 10^{11} - 2 \cdot 10^{12}$) Вт, т.е. она сравнима с мощностью всех работающих на земном шаре электростанций.

С учетом того, что время электрической активности одного грозového облака около 0.5 часа, за сутки в глобальном масштабе образуется около 10^5 грозových облаков. В процессе образования грозových облаков в атмосферу выделяется скрытая теплота, равная теплоте парообразования. При образовании одного грозového облака количество выделяемой скрытой теплоты лежит в пределах $10^{14} - 10^{15}$ Дж, а за сутки в глобальном масштабе ее выделяется ($10^{19} - 10^{20}$) Дж. В атмосфере как в тепловой машине происходит преобразование тепловой энергии в кинетическую. КПД этой машины $\sim (1 - 2)\%$ [26]. Поэтому кинетическая энергия, появляющаяся при преобразовании в атмосфере скрытой теплоты, равна $\sim (2 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{18})$ Дж. Она достаточна для образования одного циклона за одни сутки. Соответственно, она достаточна для заметного изменения погоды.

Количество воды, выливаемой из грозových облаков, можно оценить следующим образом. Как показано в [27], водосодержание грозového облака и его электрическая активность (количество молний в минуту) связаны между собой законом, приближаю-

щимся к линейному. Водосодержание среднего грозового облака с электрической активностью ~ 10 молний в минуту (это суммарное число внутриоблачных и облако-земля молний) составляет около 200000 тонн воды. При общем числе грозовых облаков 10^5 , появляющихся за сутки, количество выливаемой из них воды $\sim 2 \cdot 10^{10}$ тонн.

Приведенные выше оценочные расчеты показывают, что при изменениях грозовой активности на Земле должны происходить заметные погодные изменения. Как показали наблюдения Р. Рейтера, при прохождении активной области через центральный меридиан Солнца усиление грозовой активности достигает 60%. Если указанные изменения происходят, то они должны наблюдаться.

Наблюдать одновременно за изменениями грозовой активности и погоды на Земле весьма сложно. Это связано с тем, что грозовые облака появляются не везде и не так часто, их размеры и время жизни весьма ограничены (порядка 2 км в радиусе и ~ 1 час во времени). Кроме наблюдений Р. Рейтера, имеются спутниковые наблюдения за изменениями грозовой активности, однако их продолжительность невелика – менее 2-х лет [28]. По указанным причинам в настоящее время отсутствуют прямые данные, свидетельствующие о связи погоды с грозовой активностью. В то же время имеются косвенные доказательства того, что такая связь существует. К таким доказательствам можно отнести следующие многолетние наблюдения.

В Европе в конце 1920-х годов попытки практического применения данных о солнечной активности к метеорологическим прогнозам были произведены Мирбахом и Ауфзесом [29]. Мирбаху удалось подметить, что число циклонов заметно увеличивается, когда активная область располагается близ центра Солнца. (Этот факт можно объяснить лепестковым характером диаграммы направленности ветра из активной области Солнца.) Основываясь на этом, Мирбах время от времени давал прогнозы. В частности, он предупредил французских летчиков, планировавших в начале 1927 г. первый перелет из Франции в США, о возможности в ближайшее время развития штормовой ситуации над Атлантикой ввиду того, что в день, намеченный для вылета, из-за края Солнца вышла большая группа пятен. Его прогноз оправдался. Шторм послужил причиной гибели французских пилотов.

Во Франции изучением связи погоды с солнечной активностью занимался Мемери [30]. На основе многолетних наблюдений он делал успешные прогнозы о суровых зимах и жарких летах. Он указывал, что пятна, расположенные на небольших гелиографических широтах, оказывают более сильное влияние на земные явления, чем высокоширотные. Этот установленный им факт объясняется тем, что диаграмма направленности

высокоскоростного ветра активной области Солнца имеет вид лепестка.

В России изучением связи погоды с солнечной активностью занимался А. В. Дьяков. Он еще в 1938 г. обнаружил систематическое появление потоков тропического воздуха над территорией Западной Сибири спустя 3 – 4 суток после прохождения активной области через центральный меридиан Солнца. Наблюдая регулярно за поверхностью Солнца с 1940 по 1972 гг. он давал успешные прогнозы погоды для западной Сибири [31]. Высокую оправдываемость прогнозов А. В. Дьякова можно объяснить усилением грозовой активности в тропиках через 2 суток после прохождения активной области через центральный меридиан Солнца и далее переносом теплого воздуха из тропиков на Алтай в течение следующих двух суток.

В США У. Робертс и Р. Олсон [32, 33] обнаружили, что завихренность атмосферы (мера циклогенеза) значительно увеличивается через 3 – 4 суток после начала геомагнитной бури. Дж. Уилкоккс и др. [34] показали затем, что индекс атмосферной завихренности, применявшийся У. Робертсом и Р. Олсоном, реагирует таким же образом и на пересечение Землей границ солнечных магнитных секторов.

Влияние грозowych облаков на сейсмичность Земли. Из грозowych облаков выпадают, как правило, ливневые осадки. Их скорость лежит в пределах от 8 м/с (капли дождя) до 16 м/с (крупа) [35]. Как было показано выше, масса осадков, выпадающих из одного облака средних размеров, составляет $\sim 2 \cdot 10^5$ т, а за сутки в глобальном масштабе из грозowych облаков выпадает $\sim 2 \cdot 10^{10}$ т. Эти осадки оказывают большое давление на земную кору и верхнюю мантию и, тем самым, влияют на глобальную сейсмичность Земли.

В работах А. Д. Сытинского [36, 37] рассмотрен вопрос о связи времени возникновения сильных землетрясений с наличием и положением активных областей на Солнце. Как оказалось, землетрясения происходят в среднем на 3 день после прохождения активной области через центральный меридиан. Землетрясения происходят также в дни прихода к Земле высокоскоростного ветра от корональных дыр. Результаты этих исследований свидетельствуют в пользу того, что связь сейсмичности Земли с активными областями и корональными дырами на Солнце осуществляется посредством высокоскоростного солнечного ветра через грозовую активность на Земле. В связи с тем, что активные области и корональные дыры вращаются вместе с Солнцем, имеется возможность учета вариаций солнечной активности при прогнозировании изменений глобальной сейсмической активности Земли.

Инверсии геомагнитного поля и грозовая активность. Грозовая активность долж-

на зависеть также от величины напряженности геомагнитного поля. Чем меньше эта величина, тем на большую глубину должен проникать высокоскоростной солнечный ветер в атмосферу и тем выше должна быть грозовая активность. Максимум грозовой активности должен наблюдаться в периоды инверсий геомагнитного поля, когда напряженность геомагнитного поля снижается до нуля. В эти периоды должны быть максимальными угловая скорость суточного вращения, сейсмичность и вулканическая деятельность (излияние лавы) на Земле. Вулканы и землетрясения – это разные проявления одних и тех же геологических процессов [38]. Как показано в [38], при излиянии 1 млн. км^3 лавы (этот процесс длится несколько тысяч лет) в атмосферу поступает не менее 10^{14} тонн CO_2 и примерно столько же CH_4 (общее содержание CO_2 в современной атмосфере $2.3 \cdot 10^{12}$ тонн). В результате излияния лавы и парникового эффекта, связанного с избыточным содержанием этих газов в атмосфере (парниковый эффект от метана CH_4 превосходит в 35 раз аналогичный эффект от CO_2), должны происходить таяние ледников и эвстатические ("вековые") колебания уровня Мирового океана, изменения химического и изотопного состава океанической воды, климата и рельефа.

В периоды инверсий геомагнитного поля из-за повышенной грозовой активности должны наблюдаться большие выливания магмы, избыточное содержание CO_2 и CH_4 , недостаток O_2 и, как следствие, вымирание организмов. Об этом свидетельствуют фанерозойские мантийные плюмы и массовые вымирания организмов (в том числе динозавров) на Земле [39].

Известно, что в последнее время наблюдается уменьшение магнитного поля Земли на $\sim 0.5\%$ в десятилетие [40]. Оно должно сопровождаться повышением грозовой активности, усилением вулканической активности, парникового эффекта. В какой-то части оно может быть ответственным за наблюдаемое потепление климата.

Заключение. В результате анализа многолетних данных о наблюдениях за вариациями напряженности электрического поля в горах, которые характеризуют вариации глобальной электрической активности гроз, и данных об изменениях солнечной активности сделан вывод о том, что максимальная грозовая активность наблюдается на Земле примерно через 2 суток после прохождения активной области через центральный меридиан Солнца. В эти моменты времени грозовая активность возрастает на десятки процентов (до $> 60\%$), что может приводить к усилению ливней, штормов, ураганов в определенных регионах земного шара. Наблюдения подтверждают этот вывод. Грозовая активность усиливается также при попадании Земли в высокоскоростной поток солнечного ветра, исходящий из корональных дыр.

Активная область появляется сначала на краю диска Солнца, поэтому имеется возможность прогнозирования моментов ее появления на центральном меридиане и учета влияния этой области при краткосрочном прогнозировании изменений погоды (на несколько суток). Большие активные области существуют на Солнце в течение нескольких оборотов Солнца, поэтому имеется возможность учета солнечной активности при долгосрочном прогнозировании изменений погоды, а возможно и сейсмической активности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства промышленности, науки и технологий РФ (тема 14: Взаимодействие гелиокосмических факторов с атмосферой Земли).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Ермаков V. I., Stozhkov Yu. I. Proceedings of 11th International Conference on Atmospheric Electricity, USA, Alabama, 1999, p. 242.
- [2] Ермаков В. И., Стожков Ю. И. Препринт ФИАН N 25, М., 2002.
- [3] Ермаков В. И. Геомагнетизм и аэрономия, **40**, N 1, 129 (2000).
- [4] Ливингстон У. К. В кн.: Солнечно-земные связи, погода и климат. Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Селиги. М., Мир, 1982, с. 61.
- [5] Рейтер Р. В кн.: Солнечно-земные связи, погода и климат. Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Селиги. М., Мир, 1982, с. 275.
- [6] Reiter R. Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity. Amsterdam: Eesevier, 1992.
- [7] Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов. М., Мир, 1980.
- [8] Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Пер. с англ. Л., Гидрометеоздат, 1974.
- [9] Витинский Ю. И. Солнечная активность. М., Наука, 1983.
- [10] Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск, Наука, 1981.
- [11] Физика космоса. Маленькая энциклопедия. М., Советская энциклопедия, 1986, с. 636.
- [12] Братолобова-Цулукидзе Л. С., Грачев Е. А., Григорян О. Р., Нечаев О. Ю. Космические исследования, **39**, N 6, 602 (2001).
- [13] Gish O. H. and Wait G. R. Journal of Geophysical Research, **55**, N 4, 473 (1950).

- [14] Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. М.-Л., ГТТЛ, 1950.
- [15] Неррнерг Ж. Р., Маупард Н. С., and Аггсон Т. Л. *Space Science Reviews*, **22**, N 6, 777 (1978).
- [16] Ришбет Г., Гарриот О. К. Введение в физику ионосферы. Л., Гидрометеиздат, 1975.
- [17] Кузнецов В. В., Плоткин В. В., Нестерова Г. В., Нестерова И. И. *Геомагнетизм и аэрономия*, **38**, N 2, 107 (1998).
- [18] Гокон А. М., Тырнов О. Ф. *Геомагнетизм и аэрономия*, **38**, N 1, 184 (1998).
- [19] Исаев Н. В., Сорокин В. М., Чмырев В. М., Серебрякова О. Н., Яценко А. К. *Космические исследования*, **40**, N 6, 591 (2002).
- [20] Goldberg R. A., Varcus J. R., Hale L. C., Curtis S. A. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **48**, N 3, 293 (1986).
- [21] Kelley M. C., Ding J. C., and Holzworth R. H. *Geophysical Research Letters*, **17**, N 12, 2221 (1990).
- [22] Ермаков В. И., Охлопков В. П., Стожков Ю. И. *Краткие сообщения по физике ФИАН*, N 10, 18 (2002).
- [23] Stergis C. G., Rein G. C., and Kangas T. *Journal of Atm. Terr. Physics*, **11**, 77 (1957).
- [24] Марксон Р. В кн.: *Солнечно-земные связи, погода и климат*. Под ред. Б. Мак-Кормака и Т. Селиги. М., Мир, 1982, с. 242.
- [25] Brooks C. E. P. *Geophysics and Meteorologie*, London, **24**, 138 (1925).
- [26] Борисенков Е. П. В сб.: *Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды*. Л., Гидрометеиздат, 1974, с. 111.
- [27] Schroeder V. and Baker M. B. *Proceedings of 11th International Conference on Atmospheric Electricity*. Alabama, USA, June 7 – 11, 1999 p. 276.
- [28] Cristian H. J., Blakeslee R. J., Bosphio D. J., et al. *Proceedings of 11th International Conference on Atmospheric Electricity*, Alabama, USA, June 7 – 11, 1999, p. 726.
- [29] Эйгенсон М. С., Гневнышев М. Н., Оль А. И., Рубашев Б. М. *Солнечная активность и ее земные проявления*. М.-Л., ГТТИ, 1948.
- [30] Memery H. *L'Action individuelle des Taches solaires sur les phenomenes terrestres*. Talence, 1948, p. 40.
- [31] Дьяков А. В. В сб.: *Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды*. Л., Гидрометеиздат, 1974, с. 307.

- [32] Roberts W. O. and Olson R. H. Rev. Geophys. Space Phys., **11**, N 3, 731 (1973).
- [33] Roberts W. O. and Olson R. H. J. Atmos. Sci., **30**, 135 (1973).
- [34] Wilcox J. M., Scherrer P. H., Svalgaard, Roberts W. O., and Olson R. H. Science, N 180, 185 (1973).
- [35] Каземир Г. В кн: Проблемы атмосферного электричества. Л., Гидрометеоиздат, 1969, с. 146.
- [36] Сытинский А. Д. Доклады Академии Наук СССР, **295**, N 2, 338 (1987).
- [37] Сытинский А. Д. Известия Академии Наук СССР. Физика Земли, N 2, 13 (1989).
- [38] Эйби Дж. А. Землетрясение. М., Недра, 1982.
- [39] Грачев А. Ф. Мантийные плюмы и массовые вымирания организмов в истории Земли. Атлас временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. "Янус-К2", 2002, с. 93.
- [40] Аллен К. У. Астрофизические величины, М., Мир, 1977.

Поступила в редакцию 16 марта 2003 г.