

НАЗЕМНЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ТРЁХ ПОСЛЕДНИХ ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2009 г. А. В. Белов¹, Е. А. Ерошенко¹, О. Н. Крякунова², В. Г. Курт³,
В. Г. Янке¹

¹ *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, Учреждение РАН (ИЗМИРАН), Троицк (Московская обл.)*

² *Институт ионосферы Национального центра космических исследований и
технологий Республики Казахстан*

³ *Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, 119899 Москва,
Россия*

abelov@izmiran.ru

Поступила в редакцию....

Представлен каталог наземных возрастаний солнечных космических лучей в 21-23 циклах солнечной активности. Исследованы основные свойства и временное распределение этих событий, их связь с солнечными источниками и протонными возрастаниями, наблюдаемыми на спутниках.

ВВЕДЕНИЕ

Наземные возрастания солнечных космических лучей (GLE) - это самые большие и наиболее изучаемые из протонных возрастаний. Составляя малую (< 5%) часть протонных событий, они привлекают значительно большую долю внимания. Практически каждому из GLE посвящено множество научных публикаций, многие из них служат предметом специальных заседаний, а иногда и целых конференций. Изучение ускоренных на Солнце частиц началось с изучения наземных возрастаний, и первые два десятилетия было основано только на данных наземных детекторов космических лучей (Дорман и Мирошниченко, 1965).

Из всех явлений солнечно-земной физики только GLE имеют порядковые номера. Их отсчёт ведётся с 28 февраля 1942 г., когда ионизационными камерами был зарегистрирован GLE номер 1 (Smart and Shea, 1991), и заканчивается недавним событием, наблюдавшимся 13 декабря 2006 г. и получившим номер 70 (например, Plainaki et al., 2008). В среднем на год приходится одно такое событие. Однако нужно учесть, что до периода МГТ, когда была создана мировая сеть нейтронных мониторов, регистрация солнечных КЛ наземными детекторами не была надёжной, и в первую часть списка могли попасть только самые большие наземные возрастания. За первые 15 лет зарегистрировано только 5 GLE, но трудно сомневаться в том, что в 17-ом и 18-ом циклах были пропущены многие события, которые, случись они позже, были бы зарегистрированы как наземные возрастания. Возможно, были пропущены и некоторые наиболее слабые возрастания 19-го цикла.

Нейтронные мониторы были созданы для изучения вариаций космических лучей, и нужно заметить, что самые большие вариации в данных нейтронных мониторов мы видим во время наземных возрастаний солнечных КЛ. Иногда они на два порядка большие, чем самые большие Форбуш-понижения и 11-летняя модуляция.

По количеству и уровню работ среди множества исследователей наземных возрастаний солнечных КЛ выделяются американские учёные Шей и Сمارт (M. Shea, D. Smart). Под их руководством данные многих GLE были стандартизированы и собраны вместе (Gentile et al., 1990). Сейчас эта база данных передана в [Australian Antarctic Data Centre](http://www.aadc.gov.au/) и поддерживается и

развивается австралийскими исследователями (<http://data.aad.gov.au/aadc/gle>). К сожалению, далеко не все наземные наблюдения солнечных КЛ удалось собрать и включить в эту базу данных. Особенно это относится к ранним событиям.

Большая часть работ, посвященных GLE - это анализ отдельных (обычно больших) событий. Так в последние годы появились десятки работ по возрастанию 20 января 2005 г. (например, Belov et al., 2006; Вашенюк и др., 2006; Plainaki et al., 2007; Grechnev et al., 2008; McCracken et al., 2008). Значительно реже появляются работы с обобщением и сравнением многих событий этого типа (Shea and Smart, 1990; Вашенюк 2000; Мирошниченко, 2001). GLE были включены в ранние каталоги протонных событий (Базилевская и др. 1986; Базилевская и др. 1990, Sladkova et al., 1998), а наиболее недавние из них - в каталог (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/meetings/lws-cdaw2009/LWS_CDAW_GLE_data.html; Gopalswamy et al., 2008). Однако наземные возрастания существенно отличаются от других протонных возрастаний, по меньшей мере в методическом аспекте, и их специфику трудно отразить в общем каталоге протонных событий. В последние годы появилась работа Клайвера (Cliver 2006), содержащая каталог GLE за период 1979-2005 гг. Этот каталог является продолжением каталога более ранних GLE, наблюдавшихся в 1942 - 1978 гг. (Cliver et al. 1982).

Цель данной работы обобщить наземные наблюдения солнечных КЛ в трёх последних циклах солнечной активности (1976-2007 гг.) в виде каталога наземных возрастаний, дополняющего и уточняющего ранее опубликованные сведения. Особое внимание в нашем каталоге уделено характеристикам солнечных событий, с которыми были связаны GLE.

ДАННЫЕ

Большинство представленных ниже результатов получено с помощью базы данных рентгеновских вспышек и протонных событий (Белов и др., 2005). Поскольку эта база данных объединяет наблюдения рентгеновских вспышек (1-8 Å), проводимые на спутниках серии GOES, с осени 1975 г., это и определило временной охват событий.

Первое из попавших в каталог наземное возрастание, наблюдавшееся 30 апреля 1976 г. и формально (по времени) и по существу (по связи с активной областью) относится к 20-му циклу. Но оно опередило минимум в сглаженных числах пятен всего на два месяца. Последнее событие (13 декабря 2006 г.), стало и последним GLE 23-го цикла. Поэтому, говоря о событиях в трёх полных циклах солнечной активности, мы не сильно ошибаемся. В наш анализ включены 44 наземных возрастания, что составляет почти две трети всех зарегистрированных событий такого рода.

В период работы спутников GOES основными наземными детекторами космических лучей были и остаются нейтронные мониторы. Сложившаяся в последние десятилетия практика такова, что наземным возрастанием солнечных космических лучей признаётся протонное возрастание, которое надёжно выделяется из данных хотя бы одного нейтронного монитора. С июля 1957 г., когда появилась мировая сеть нейтронных мониторов, она обеспечивает непрерывный мониторинг солнечных протонных событий. Качество этого мониторинга зависит от того, сколько станций космических лучей работало в тот или иной период и какие это были станции. Оно меняется со временем, однако эти изменения в последние 50 лет не очень велики. Это означает, что случись пронумерованные GLE в любое другое время в эти же 50 лет, они все равно были бы зарегистрированы. Наиболее сильно на способность мировой сети наблюдать солнечные КЛ влияет присутствие высокоширотных высокогорных станций, таких как антарктические станции Восток и Южный Полюс. Ст. Восток (3488 м. над уровнем моря и географические координаты Ю78.5, В106.8) работала в советские времена эпизодически, а с 1990 г. полностью перестала работать, не успев раскрыть свои уникальные возможности. Ст. Южный Полюс (South Pole, Ю90, 2820 м.) непрерывно работала с февраля 1977 г. до ноября 2005 г., когда была закрыта по техническим причинам. Обычно именно ст. Южный Полюс регистрировала самое большое возрастание, обусловленное солнечными космическими лучами. Следует признать, что, в связи с её закрытием (хочется надеяться, временным) мировая сеть нейтронных мониторов

стала менее эффективным инструментом для выявления и изучения солнечных протонных событий. Если, к примеру, в ближайшее время повторится такое событие, как GLE 17 января 2005 г., то оно не будет зарегистрировано на Земле.

Некоторые из включенных в каталог событий зарегистрированы не только нейтронными мониторами, но и детекторами, чувствительными к более высоким энергиям космических лучей (мюонные детекторы, ионизационные камеры). Это случается редко во время наиболее крупных событий, наиболее ярким примером которых может служить GLE 42 29 сентября 1989 г. В большинстве же событий возрастание не наблюдается не только мюонными детекторами, но и многими (как правило, низкоширотными) нейтронными мониторами. В данной работе из наземных наблюдений космических лучей мы использовали только данные нейтронных мониторов. В наш каталог вошли последние GLE с номерами от 27 до 70. Под теми же номерами они представлены в базе данных наземных возрастаний солнечных КЛ (<http://data.aad.gov.au/aadc/gle>) и в других каталогах (например, Cliver, 2006). Каталог можно считать полным, поскольку периоды возможных наземных возрастаний тщательно проверялись и обсуждались многими опытными исследователями, и никакое значительное возрастание не могло быть при этом пропущено.

Вместе с тем следует помнить, что на наземные наблюдения солнечных КЛ влияет множество факторов (межпланетная обстановка, геомагнитные возмущения, неоднородность распределения наземных детекторов по земному шару и т.п.). Сложилось сочетание этих факторов по-другому, наш каталог мог бы стать другим. Некоторые события могли бы остаться незамеченными, другие, наоборот, были бы добавлены к каталогу. Таким образом, даже каталог таких крупных и редких событий, как наземные возрастания солнечных КЛ, может содержать случайные элементы. Правда, это касается только самых слабых из включенных в него событий.

ОПИСАНИЕ КАТАЛОГА

В первых двух колонках таблицы 1 дан номер GLE и дата его начала (год, месяц, день). В следующих трёх колонках приведены характеристики ассоциированной с GLE вспышки: рентгеновский и оптический балл; время начала рентгеновской вспышки и время её максимума; координаты (гелиоширота и гелиодолгота) вспышки. Характеристики вспышки не всегда присутствуют. В одном из самых ранних событий (24 сентября 1977 г.) не было рентгеновских наблюдений (к тому же вспышка была далеко за лимбом), поэтому не дано время начала вспышки, а время максимума приведено условно по времени начала радио всплеска типа II. В этом случае, как и в других залимбовых вспышках, координаты вспышки взяты не из наблюдений, а оценены. Обычно, это достаточно просто, поскольку до ухода за западный лимб одна и та же активная область генерирует много мощных вспышек и, часто с ними связан несколько протонных возрастаний. Это даёт возможность приписать предполагаемую вспышку этой группе пятен и оценить положение этой вспышки перед наземным возрастанием. Наиболее сложным в этом отношении является событие 16 февраля 1984 г. В работе Kane et al. (1992) сделано и обосновано предположение о том, что оно связано с группой пятен 4408, ушедшей с диска 13 февраля. Эта активная область, проходя по диску, генерировала 2 вспышки балла М, несколько вспышек балла С, но не была связана ни с одним протонным событием. Однако перед уходом с диска она усложнила свою магнитную структуру до дельта-конфигурации, активизировалась и генерировала свои самые значительные вспышки (10 и 11 февраля). Если за лимбом она продолжила своё развитие, то это могло создать условия для большого протонного события. Мы приняли это предположение, в соответствии с которым ассоциированная вспышка произошла на долготе W125-130 и является самой далёкой западной вспышкой в нашем каталоге. Следует, правда, учитывать, что локализация солнечного источника для этого события является проблемной, и ряд авторов (например, Lockwood et al. 1985) предлагали другую, более близкую к лимбу, локализацию. Для двух из ранних событий (22 ноября 1977 г. и 7 мая 1978 г.) рентгеновские измерения были не полными, из-за этого не удалось установить время максимума рентгеновского потока.

В следующих двух колонках даны сведения об активных областях, к которым относятся ассоциированные с GLE вспышки, полученные на основе данных из каталога USAF-MWL (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_REGIONS/USAF_MWL). Поскольку многие из вспышек, связанных с GLE, произошли у лимба или за лимбом, площадь активной области в момент вспышки трудно или невозможно определить. Поэтому мы включили в таблицу не площадь АО в момент вспышки, а максимальную для этой группы пятен площадь.

Далее в таблице представлены величина максимального возрастания скорости счёта $\Delta_{\max}$, с указанием временного периода и станции, на которой возрастание было наибольшим. Для сравнительного анализа различных наземных возрастаний важно иметь какую-то характеристику, отражающую величину возрастания. Казалось бы, такой характеристикой могла бы стать величина максимального возрастания скорости счёта, но это справедливо только с существенными оговорками. Прежде всего, мы не имеем полных данных о многих из GLE. Из-за этого, в частности, в таблице много раз в качестве станции с максимальным возрастанием появляется ст. Оулу (Финляндия). Эта станция является высокоширотной и не превосходит по своей чувствительности к солнечным КЛ другие подобные станции. Однако результаты регистрации всех GLE на этой станции собраны вместе и хорошо представлены в нашей таблице и в Интернет (<http://cosmicrays.oulu.fi/GLE.html>). Другие станции могли бы упоминаться чаще, если бы сотрудники этих станций последовали положительному примеру финских коллег. В этом случае для некоторых из GLE максимальные возрастания стали бы несколько выше представленных сейчас. Проблема неполноты данных не является самой серьёзной из проблем, мешающих использовать величину $\Delta_{\max}$, как одну из основных характеристик GLE, и её можно решить. Две другие проблемы (изменение сети наземных детекторов со временем и различия в условиях наблюдения различных GLE) более серьёзны и с ними невозможно полностью справиться. Обе эти проблемы связаны с большими различиями в возможностях отдельных нейтронных мониторов регистрировать солнечные космические лучи. Если вариации галактических КЛ обычно видны на всех нейтронных мониторах и различаются между собой не более, чем в несколько раз, то для солнечных КЛ, с их значительно более мягким энергетическим спектром и большой анизотропией, различия часто достигают нескольких порядков. На низкоширотных нейтронных мониторах во многих GLE вообще не удаётся выделить никакого эффекта, самые же большие возрастания должны регистрироваться на высокоширотных и одновременно высокогорных нейтронных мониторах. В реальности такие мониторы или вообще отсутствовали, или, что было в большинстве случаев, работал только один из них (ст. Южный Полус). И эти два случая существенно различаются по наблюдательным возможностям сети, что с большой вероятностью приводит к соответственным различиям в наблюдавшихся максимальных возрастаниях. Так, например, если бы ст. Южный Полус работала в декабре 2006 г., то, скорее всего величина $\Delta_{\max}$ для этого события была бы больше. Напротив, без ст. Южный Полус в январе 2005 г. она для GLE 69 была бы меньше, а GLE 68, вообще, осталось бы незамеченным. Из-за неравномерности распределения детекторов КЛ по земному шару на величину $\Delta_{\max}$ влияют сезон и время суток наблюдения определённого возрастания. Дело в том, что максимальное возрастание регистрируется, как правило, в начале события, когда к Земле приходит узкий интенсивный пучок высокоэнергичных частиц (например, Shea and Smart, 1990; Smart and Shea, 2003; Белов и др., 2005; Вашенюк и др., 2006). Он наблюдается только короткое время (иногда, несколько минут) и очень важно, как в это время относительно этого пучка будут расположены самые высокочувствительные нейтронные мониторы. Если пучок придёт на зону, далёкую от их асимптотических направлений, величина $\Delta_{\max}$ окажется существенно заниженной. И, напротив, она будет завышенной, если под пучок попадёт такая станция как Южный Полус. Таким образом, величины наблюдаемых на Земле максимальных возрастаний $\Delta_{\max}$, для различных событий не могут точно отражать не только количество заряженных частиц, ускоренных до высоких энергий на Солнце, но и количество таких частиц дошедших до Земли. По этим же причинам

ухудшается корреляция наземных и спутниковых измерений солнечных протонных возрастаний.

В последних колонках таблицы даны максимальные возрастания интегральных потоков протонов с энергией >10 и >100 МэВ, измеренных на спутниках IMP-8 и GOES (Belov et al., 2005).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ВОЗРАСТАНИЙ ПО ВРЕМЕНИ

Рис. 1 показывает, как все зарегистрированные наземные возрастания солнечных космических лучей распределены по времени.

Можно видеть, что временное распределение моментов GLE сложное, во многом, случайное и меняется от цикла к циклу. Наземные возрастания случаются на всех фазах солнечного цикла (Shea & Smart, 1990), включая фазу минимума, но в минимумах они реже, чем в другие периоды. Именно на минимумы солнечной активности приходится самые долгие перерывы в наблюдениях GLE: 5 лет и 4 дня в 1992-1997 гг. и ровно 5 с половиной лет с 16 февраля 1984 до 16 августа 1989 года. Для сравнения укажем, что самый короткий промежуток между отдельными GLE (около 35 часов) пришёлся на недавние 28-29 октября 2003 г. На рис. 1 хорошо видно, что моменты GLE приходятся на периоды локальных кратковременных максимумов числа солнечных пятен. Дело в том, что наземные возрастания солнечных КЛ являются одним из проявлений больших всплесков солнечной активности, которые не обходятся без возрастания числа пятен. О распределении GLE между тремя последними циклами солнечной активности даёт представление табл. 2

Усреднение рентгеновской мощности в таблице 2 проведено по логарифмам, для вспышек в диапазоне видимых долгот E85-W85.

Количество наземных возрастаний мало меняется от цикла к циклу. Это станет ещё более очевидным, если вспомнить, что в 19 цикле зарегистрировано 11 GLE, а в 20-м – 12. Из-за того, что наименьшее количество GLE пришлось на самый ранний 19-й цикл, а наибольшее – на самый поздний 23-й, может возникнуть впечатление, что наземных возрастаний со временем становится всё больше. Однако важно помнить, что в 23-м цикле возможности наблюдения слабых наземных возрастаний были значительно лучше, чем в 19-м. С учётом этого обстоятельства о малой изменчивости количества GLE от цикла к циклу можно говорить ещё увереннее. С другой стороны ясно, что этот вывод относится только к немногим уже изученным циклам, и в будущем вариации количества наземных возрастаний могут значительно возрасти.

Как показывает табл. 2 средняя величина GLE (усреднённая по всем событиям цикла величина $\Delta_{\max}$) также не сильно меняется от цикла к циклу. Более значительные изменения демонстрирует средний балл рентгеновской вспышки, ассоциированной с GLE.

СВЯЗЬ НАЗЕМНЫХ ВОЗРАСТАНИЙ С ПРОТОННЫМИ ВОЗРАСТАНИЯМИ МЕНЬШИХ ЭНЕРГИЙ

Сравним события, в которых солнечные космические лучи были зарегистрированы на Земле и на спутниковых детекторах (IMP-8 и GOES).

Несмотря на перечисленные в описании каталога причины, нарушающие связь между спутниковыми и наземными возрастаниями, и различия в энергетической зависимости потоков солнечных КЛ в различных событиях, корреляция между величиной потока J_{100} протонов с энергией >100 МэВ и величиной максимального наземного возрастания $\Delta_{\max}$ достаточно велика (рис. 2) и соответствует степенной зависимости $J_{100} = a\Delta_{\max}^{\alpha}$ где $\alpha=0.64\pm0.09$, $a=2.22\pm0.14$ (коэффициент корреляции – 0.74). Заметим, что аналогичные вычисления для интегрального потока протонов с энергией >10 МэВ дают значительно худшую корреляцию с $\Delta_{\max}$ (коэффициент корреляции – 0.42).

Самый низкий поток протонов (5.3 pfu) с энергией >100 МэВ, при котором наблюдалось наземное возрастание, отмечен 28 мая 1990 года. Но были и события, в которых наблюдался значительно более высокий поток J_{100} , а наземное возрастания не происходило: 9 раз поток J_{100} превышал величину 10 pfu без регистрации солнечных КЛ на Земле. Самое большое из этих протонных событий случилось в последнем солнечном цикле

8 ноября 2000 г., когда поток протонов с энергией >100 МэВ достиг 451 pfu. Только трижды за последние десятилетия регистрировался ещё больший поток J_{100} и во всех этих случаях (29 сентября 1989 г., 14 июля 2000 г. и 20 января 2005 г.) мы видели не просто наземное возрастание, но большое наземное возрастание.

Отсутствие наземного возрастания при больших потоках J_{100} , по-видимому, можно объяснить сочетанием особенностей солнечного ускорителя в этих случаях с особыми условиями распространения солнечных КЛ. Заметим, что значительную часть аномальных событий ($J_{100}>10$ pfu, нет GLE) составили события с далёкими солнечными источниками (восточными и залимбовыми или прилимбовыми западными). Но есть и такие события, которые заставляют предполагать резкое ослабление эффективности солнечного ускорения в диапазоне энергий 100-1000 МэВ/нуклон.

Табл. 3 позволяет сравнить средние характеристики двух классов мощных протонных событий: наземных возрастаний и протонных возрастаний, при которых интегральный поток протонов с энергией >100 МэВ по спутниковым данным превышал 2 pfu, но на Земле возрастание не регистрировалось, а также средние характеристики рентгеновских вспышек, связанных с этими двумя классами протонных событий. Можно видеть, что различия ассоциированных вспышек по продолжительности, широте и даже мощности не очень велики. Сильнее различаются средние долготы этих вспышек. За этим не обязательно стоит реальное различие в средней долготе места ускорения. В большей степени это связано с тем, что долготное распределение вспышек, ассоциированных с $J_{100}>2$ pfu, но не с GLE, намного шире распределения GLE-вспышек и простирается почти до восточного лимба. Вероятно, это распределение расширяется также и на запад (значительно дальше западного лимба). Поскольку мы вынуждены исключить залимбовые области из рассмотрения, и это практически касается только западных залимбовых вспышек, средние долготы существенно сдвигаются на восток и этот сдвиг для GLE-вспышек явно меньше.

Наиболее существенным различием рассматриваемых групп мощных событий, по-видимому, является разница их энергетических спектров (Осокин и др. 2006). Усреднённый показатель γ , приведённый в таблице 2, получен в предположении, что интегральный спектр протонов в диапазоне 10-100 МэВ является степенным. Ясно, что наземными протонными возрастаниями становятся события с более жестким (в среднем) энергетическим спектром ускоренных частиц, наблюдаемых у Земли. Менее ясны причины такого ужесточения спектра. Является ли в таких событиях спектр частиц особо жестким уже в месте ускорения, или же обогащение высокими энергиями – это результат распространения частиц от Солнца к Земле?

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ НАЗЕМНЫХ ВОЗРАСТАНИЙ С РЕНТГЕНОВСКИМИ СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ

Рис. 3 позволяет видеть сходство во временных изменениях годовых количеств мощных ($\geq X1$) рентгеновских вспышек N_X и наземных протонных возрастаний N_G . Действительно, 1989 год с рекордным количеством вспышек $\geq X1$ (59) оказался рекордным и по количеству GLE - 7. С другой стороны, в течение 9 лет, в которые количество вспышек $\geq X1$ было меньше 3, не зарегистрировано ни одного GLE.

Между обсуждаемыми количествами существует линейная регрессионная связь $N_G=0.34+0.073N_X$ (коэффициент корреляции 0.685). Это соотношение означает, что на каждые ~ 14 вспышек $\geq X1$ приходится по одному GLE.

По годовым данным корреляция количества GLE с количеством мощных ($\geq X1$) рентгеновских вспышек явно теснее, чем с числом солнечных пятен (коэффициент корреляции 0.51). Вместе с тем, можно заметить, что связь N_G и N_X не всегда очевидна. Наиболее явное нарушение этой связи даёт 1980 г., когда не было GLE, но наблюдали 21 вспышку $\geq X1$. Однако из 13 самых вспышечно - активных лет, когда количество $\geq X1$ вспышек превышало 13, этот год явился единственным исключением. В остальные 12 таких лет GLE наблюдались.

Приведённое выше эмпирическое регрессионное уравнение можно использовать для

грубых оценок количества ожидаемых наземных возрастаний в достаточно большие интервалы времени, для которых мы сможем получить прогнозы количества вспышек. Возможно его применение и для оценки количества вспышек в прошлые годы. Так, например, в 20-м солнечном цикле регулярные рентгеновские наблюдения не проводились, но мы знаем, что в 1966-1976 гг. зарегистрировано 13 GLE. Исходя из того же уравнения, можно оценить, что в 20-м цикле вспышек с мощностью $\geq X1$, должно было быть 140+30.

7. НАЗЕМНЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ И МОЩНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Трудно сомневаться в статистической связи вспышек и наземных протонных возрастаний, но является ли эта связь одновременно и физической? Связаны ли все GLE со вспышками? Если так, то должны ли эти вспышки быть большими? Попробуем ответить на эти вопросы. Из 44 рассматриваемых нами GLE-событий – 38 связаны с большими (major) рентгеновскими вспышками с баллом $>M5$. Из этих вспышек только одна имела мощность ниже $X1$ (вспышка M7.1 26 декабря 2001 г.). Т. е. для явного большинства GLE связь с большими вспышками существует и является правилом. Обсудим оставшиеся 6 событий. В двух из них (24 сентября 1977 г. и 16 февраля 1984 г.) вспышки вообще не наблюдались. Остальные вспышки имели мощность от C2 до M1. В 4 случаях из 6, включая оба события без вспышки, есть все основания считать, что источник ускоренных частиц был на невидимой стороне Солнца. Это достаточно частое явление для протонных возрастаний, и особенно для наземных возрастаний. Среди 44 обсуждаемых GLE 7 событий связаны с источниками за западным лимбом. В этих случаях мы либо не видим вспышку, либо видим только самую высокую ее часть, т.е. видим ее с существенно заниженной мощностью. В четырех проблемных событиях долгота ассоциированных залимбовых вспышек оценена по косвенным данным и меняется от $\sim W95$ до $\sim W120$. Ясно, что за вспышкой C9.7 с оцененной долготой $W120$ должна скрываться гигантская вспышка с баллом $\gg X1$. И для всех других залимбовых источников истинная мощность ассоциированных вспышек должна быть существенно выше видимой. Таким образом, четыре обсуждаемых залимбовых источника частиц должны быть связаны с достаточно мощными вспышками и это те исключения, которые подтверждают правило.

Остаются только два события, не связанные с большими вспышками. Это GLE 21 августа 1979 г. (вспышка C6.0/1B N15W38) и 10 мая 1981 г. (вспышка M1.3/2B N01W75). Эти 2 события, по-видимому, следует считать реальными исключениями из правила, связывающего GLE с большими вспышками, и это послужило причиной специального детального исследования (Cliver, 2006). Следует отметить, что после этих двух сравнительно слабых, но удобно расположенных вспышек, зарегистрированы небольшие GLE, с максимальными возрастаниями на нейтральных мониторах 6 и 3 %.

подавляющее большинство GLE-вспышек на видимой части солнечного диска имеет мощность от $X1$ и выше. Из 36 таких вспышек только 3 имели класс M и только одна, обсуждавшаяся выше, - C6, еще слабее. Доля GLE-вспышек, в целом, увеличивается с возрастанием рентгеновской мощности. Рассмотрим (рис. 4) вероятность наблюдения наземного протонного возрастания после вспышек с различной мощностью в мягком (1-8 Å) рентгене, наблюдавшихся в благоприятной долготной зоне W0-W80 (Belov et al. , 2008). Чтобы получить рис. 4 все рентгеновские вспышки 1976-2007 гг. были разделены на группы в соответствии с рентгеновским баллом (C3-C9.9, M1-M2.9, M3-M9.9, X1-X2.9, X3-X9.9 и $\geq X10$) и затем для каждой группы была найдена доля вспышек, ассоциированных с GLE. Для трёх наименее мощных групп вспышек на рис. 4 доля GLE-вспышек практически равна 0. Хотя в каждой из этих групп было по одному наземному возрастанию, общее количество вспышек такой мощности достаточно велико (4943, 1482 и 467), чтобы считать вероятность GLE пренебрежимо малой. Заметно возрастает она только при переходе к вспышкам балла X и уже в группе X1-X2.9 на 146 вспышек имеется 10 GLE, а среди 33 вспышек с мощностью от X3 до X9.9 каждая третья становится GLE-вспышкой. Наконец, 3 из 4 самых мощных ($\geq X10$) вспышек оказались связанными с наземными протонными возрастаниями. Можно сделать вывод, что, хотя обычно наземное протонное возрастание связано с мощными

рентгеновскими вспышками, в отдельных редких случаях возможна связь и со вспышками средних баллов.

Приблизительно то же самое можно сказать и о связи GLE с активными областями (группами пятен). 44 рассматриваемых GLE связаны только с 32 группами пятен из-за того, что в одной АО иногда наблюдается серия GLE-вспышек, включающая от 2 до 4 (май 1990 г.) событий. Среди этих 32 АО преобладают большие группы: у 14 из них площадь от 1000 до 2400 миллионных долей поверхности Солнца и только у 2 - <300 . Самой маленькой группой пятен оказалась АО 1926 в августе 1981 г., т.е. именно та группа, в которой произошла самая слабая из GLE-вспышек.

8. ДОЛГОТНОЕ И ШИРОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АССОЦИИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Говоря про распределение GLE-вспышек по поверхности Солнца, прежде всего, нужно подчеркнуть, что, в отличие от протонных возрастаний вообще, наземные возрастания намного лучше привязаны к солнечным источникам. Мы имеем информацию практически обо всех вспышках, ассоциированных с наземными протонными возрастаниями и почти всегда при этом связь вспышка-возрастание определяется надёжно. В 37 событиях из 44 вспышки наблюдались и в рентгеновском и в оптическом диапазонах. Но даже в тех случаях, когда не было прямых наблюдений такой вспышки, имеются косвенные данные о ней, и почти не возникает сомнений в её существовании. Более того, в этих случаях мы имеем сведения, хотя и менее точные, о времени и расположении вспышек. Практически не боясь ошибиться, можно утверждать, что все 7 оптически не привязанные GLE-вспышки произошли за западным лимбом. Почти всегда эти вспышки продолжали серии протонных и даже GLE-вспышек, наблюдавшихся в той же активной области ранее. Так было в сентябре 1977 г., когда GLE 29, случившееся 24 сентября, стало четвёртым протонным возращением и вторым GLE в активной области (АО) 889. Знаменитое GLE 42 в сентябре 1989 г. было четвёртым протонным событием в АО 5698, правда, три первые оказались слабыми. 2 ноября 1992 г. событие GLE 54 случилось через 2 дня после другого большого протонного возрастания, связанного с той же АО 7321. В апреле 2001 г. GLE 60 и 61 были связаны с АО 9415, во время первого из них АО подходила к западному лимбу, а во время второго была далеко за ним. С этой же активной областью связаны ещё 4 более ранние протонные возрастания меньшей величины. Самой впечатляющей оказалась серия из четырёх GLE в мае 1990 г., два первые события 21 и 24 мая были связаны с видимыми вспышками, а два последние – 26 и 28 мая с невидимыми залимбовыми вспышками, но все эти вспышки были в одной и той же АО 6063. С восточной и центральной вспышками 15 и 18 мая в этой же АО, по-видимому, связаны ещё два маленьких протонных возрастания. Таким образом, 6 из 7 оптически не отождествлённых GLE входили в серии достаточно мощных протонных вспышек. Единственным исключением и одновременно наиболее проблемным событием является GLE 30, наблюдавшееся 16 февраля 1984 г.

Среди 9 вспышек, имеющих мощность $>X10$ и расположенных западнее долготы E20, 6 (т.е. 2/3) связаны с GLE. Оставшиеся 3 вспышки также протонные. Одна из них - самая слабая из отобранных (X10.1), зато 2 другие - самые мощные (X20 и X28). Обе последние - это сравнительно недавние (2 апреля 2001 г. и 4 ноября 2003 г.) вспышки, которые произошли у западного лимба (долгота W82 и W83) и которым сопутствовали достаточно большие протонные возрастания у Земли для энергии >100 МэВ (7.9 и 1.3 pfu, соответственно). Эту долготную зону никак нельзя считать неблагоприятной, поскольку имеется множество GLE-вспышек с меньшей мощностью и близкими или более западными долготами. Отсутствие (или, по меньшей мере, дефицит) высокоэнергичных частиц у Земли в этих событиях может объясняться двумя классами причин. Во-первых, возможно, эти вспышки обладают какими-либо особыми свойствами, связанными с пониженной эффективностью солнечного ускорителя. Действительно, их продолжительность явно меньше средней продолжительности протонных вспышек, не говоря уже о GLE-вспышках. Во-вторых, во время и после этих вспышек могли быть особые условия межпланетного

распространения частиц, препятствующие приходу к Земле наиболее высокоэнергичных частиц. Вполне возможно и сочетание двух классов причин. Так или иначе, следует учитывать, что и среди наиболее мощных вспышек, расположенных в наиболее благоприятной долготной зоне, не все сопровождаются GLE.

Можно выделить более узкую область ($I_x > X11$, долгота от E20 до W80), в которую войдут только 4 вспышки, зато все связанные с наземными возрастаниями. Интересно проследить, сохранится ли эта связь для будущих вспышек с такими характеристиками. Скорее всего, и в этой зоне со временем появятся исключения.

Рис. 5 показывает распределение GLE-вспышек и вспышек, ассоциированных с протонными возрастаниями, в которых поток > 10 МэВ протонов достиг 10 pfu. Нелокализованные или ненадёжно локализованные события при построении рис. 5 считались западными залимбовыми и предполагалось, что их частота линейно спадает при удалении за лимб. Можно видеть, что GLE-вспышки занимают достаточно широкую долготную зону от E30 до W130, но все-таки она уже, чем зона без источников GLE. К тому же, восточнее центрального меридиана было только 4 GLE-вспышки, а в зоне восточнее E20 - только одна (S18E30 12 декабря 1981 г.). Источники GLE, восточнее E30 и западнее W130 отсутствуют, а самая большая их плотность приходится на долготы в области W50 и W90. Долготное распределение GLE вспышек заметно уже, чем распределение менее мощных протонных возрастаний (Shea and Smart, 1996; Базилевская и Сладкова, 1986; Belov et al. 2005; Belov 2008). В зоне W15-W90 находится более 70% всех GLE-вспышек и менее половины вспышек, связанных с обычными (> 10 МэВ, ≥ 10 pfu) протонными возрастаниями.

Отметим также, что все GLE-вспышки со сравнительно небольшой рентгеновской мощностью $< X1$ произошли в той части западной зоны (от W38 до W75), где берут начало силовые линии межпланетного магнитного поля, идущие к Земле.

GLE-вспышки почти поровну распределены между южным и северным полушариями Солнца (рис. 6). Из 44 таких вспышек 23 произошли севернее экватора, остальные 21 южнее. Диапазон гелиоширот GLE-вспышек достаточно широк от S30 до N35. К северному полушарию относятся и самые высокоширотные GLE-вспышки (широту N35 имели сразу три вспышки: 23 сентября 1978 г., 21 мая 1991 г. и 24 августа 1998 г.), и самая низкоширотная вспышка, зарегистрированная 10 мая 1981 г. на широте N03. Любопытно, что в северном полушарии было 12 сравнительно высокоширотных GLE-вспышек (с широтой $> 20^\circ$), а в южном – только 5 (все в 22-м цикле). Для каждого события была рассчитана разница гелиоширот вспышки и Земли $\Delta\theta = \text{abs}(\theta_F - \theta_E)$, которая менялась от 1° в событии 19 сентября 1979 г. до 37° 21 мая 1991 г. Средний балл 7 рентгеновских GLE-вспышек на видимой части Солнца, наиболее удалённых ($\Delta\theta > 30^\circ$) по широте от Земли оказался равен X7.7, тогда как для наиболее близких ($\Delta\theta < 10^\circ$) по широте 18 вспышек он был значительно меньше – X2.1. Показательно, что обсуждавшиеся выше наименее мощные из GLE-вспышек (C6 и M2) были удалены от Земли на 8° и 7° , соответственно. Всё это позволяет сделать предположение, что более близкие к Земле по гелиошироте вспышки имеют больше шансов стать GLE-вспышками, чем значительно удалённые от Земли вспышки той же мощности. Это же относится и к разности долгот, как отмечено в работе Belov et al. (2008). Стоит заметить, что в изучаемый период все близкие по широте ($\Delta\theta < 14^\circ$) GLE-вспышки оказались не самыми мощными, самый большой рентгеновский балл в этой группе имела вспышка X4.5. Возможно, при большей мощности солнечных вспышек мы бы увидели наземные возрастания солнечных КЛ большей величины.

9. ВЫВОДЫ

Наземные возрастания солнечных космических лучей – явления редкие, но не единичные. Они появляются во время практически всех наиболее мощных всплесков солнечной активности и являются одним из наиболее ярких проявлений спорадической солнечной активности. GLE всегда появляются в комплексе с другими спорадическими явлениями (резкие возрастания солнечного излучения на всех наблюдаемых частотах от радио диапазона до гамма-лучей, ударные волны, явления пересоединения и диссипации в

солнечном магнитном поле и т.д.). В данной работе мы сосредоточились на сравнении наземных возрастаний с рентгеновскими вспышками не потому, что уверены в тесной физической связи между GLE и рентгеновскими вспышками или в том, что мягкое рентгеновское излучение лучше отражает работу солнечного ускорителя, чем другие спорадические солнечные явления. Скорее всего это не так, но преимущество рентгеновских вспышек в том, что именно они среди всех сопутствующих солнечному ускорению явлений дают наиболее полный и статистически обеспеченный материал за долгий временной период. К сожалению, в данных о радиовсплесках и, тем более, о выбросах солнечного вещества много перерывов. Можно предположить, что, имея полные данные, мы бы увидели, что CME (как и вспышки) связаны с каждым из наземных возрастаний, а возможно, и с каждым из наблюдавшихся у Земли протонных возрастаний. Более того, должны существовать связи (как минимум, статистические) между характеристиками протонных возрастаний и CME. Для 14 из 15 GLE, во время которых велись наблюдения коронографами SOHO/LASCO, зарегистрированы CME, и не случайно то, что с GLE оказались связаны самые быстрые из CME со средней скоростью у Солнца около 1800 км/с (Gopalswamy *et al.*, 2005).

Наземные возрастания солнечных космических лучей составляют часть протонных (и не только протонных) возрастаний, наблюдаемых у Земли на меньших энергиях. Характеристики GLE хорошо коррелируют с характеристиками протонных событий, регистрируемых спутниковой аппаратурой, особенно самыми высокоэнергичными её каналами. Похожим образом проявляется связь высокоэнергичных спутниковых возрастаний и GLE с солнечными источниками. Не видно никаких оснований, чтобы предлагать для объяснения наземных событий какие-то особые механизмы ускорения или какие-то необычные условия, качественно отличающие ускорительные процессы в этих событиях от обычной работы солнечного ускорителя.

Существенные отличия, разумеется, присутствуют, но они имеют количественный характер и обусловлены, в основном, тем, что наземные возрастания - это самые высокоэнергичные из возрастаний солнечных космических лучей. По этой простой причине наземные протонные возрастания начинаются раньше и проходят быстрее других видов возрастаний. По этой же причине на них меньше влияет межпланетная среда, и они теснее связаны с местом ускорения. Достаточно узкое гелиодолготное распределение вспышек, связанных с GLE, и их лучшее соответствие долготной зоне, из которой выходят идущие к Земле силовые линии межпланетного магнитного поля, на наш взгляд, свидетельствуют в пользу существенной ограниченности и сравнительно малых размеров зоны эффективного солнечного ускорения. Гречнев и др. (Grechnev *et al.*, 2008), проанализировав большое количество разнородных наблюдений, проведённых 20 января 2005 г., показали, что основная и наиболее эффективная часть ускорительных процессов в этом событии была весьма ограничена во времени и локализована в небольшом участке Солнца в зоне вспышки. Вполне возможно, что такая локализация и существенная ограниченность во времени и пространстве является общим свойством всех солнечных событий, в которых происходит ускорение до энергий ГэВ/нуклон.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №07.02.135256) и европейского проекта NMDV в рамках FP7 (GA №213007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевская Г.А., Сладкова А.И. Азимутальное распределение и выход ускоренных частиц из солнечной короны // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 26. № 2. С. 187. 1986.
- Базилевская, Г.А., Вашенюк, Э.В., Ишков, В.Н., Мирошниченко, Л.И., Назарова, М.Н., Переяслова, Н.К., Сладкова, А.И., Ступишин, А.Г., Ульянов, В.А., Черток, И.М. Солнечные протонные события, каталог 1970 - 1979 гг., под редакцией Ю.И. Логачева // Москва, ИЗМИРАН. 236 С. 1986.

- Базилевская, Г.А., Вашенюк, Э.В., Ишков, В.Н., Мирошниченко, Л.И., Назарова, М.Н., Переяслова, Н.К., Сладкова, А.И., Ступишин, А.Г., Ульев, В.А., Черток, И.М., Солнечные протонные события, каталог 1980 - 1986 гг. Под ред. Логачева Ю.И. М.; Межведомственный геофизический комитет при президиуме АН СССР. 204 С. 1990.
- Белов, А. В., Ерошенко, Е. А., Мавромичалаки, Е., Янке, В.Г.. Протонное событие 23 февраля 1956 г. по данным нейтронных мониторов // Известия РАН, сер. физ. Т. 69. № 6. С. 804. 2005.
- Вашенюк, Э. В. Релятивистские протоны в солнечных космических лучах: Дис. д-ра физ.-мат. наук: Москва, НИИЯФ, 2000.
- Вашенюк Э.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Карнов С.Н. Релятивистские солнечные протоны в событии 20 января 2005 г. Модельные исследования // Геомагнетизм и Аэронавтика. Т46. № 4. С.1-7. 2006.
- Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И. Солнечные космические лучи. М.: Наука. 468 с., 1965.
- Belov A., Garcia H., Kurt V., Mavromichalaki H. and Gerontidou M. Proton enhancements and their relation to x-ray flares during the three last solar cycles // Solar Phys., V. 229. N1. P.135. 2005.
- Belov, A.V., Eroshenko E.A., Mavromichalaki H., Plainaki C., Yanke V.G. The extreme solar cosmic ray event of January 20, 2005 // Proc. 2nd SEE, P.172, 2006.
- Belov, A., Kurt, V., Mavromichalaki, H., Gerontidou, M. Peak-Size Distributions of Proton Fluxes and Associated Soft X-Ray Flares // Solar Physics. 10.1007/s11207-007-9071-x. 11. 2007.
- Belov, A.V., Eroshenko E.A., Kryakunova O.N., Kurt V.G., Yanke V.G. X-ray flare characteristics and probability of solar proton events // Proc. 30th ICRC. SH1.6-0907. V. 1. P.167. 2008.
- Belov, A., Properties of solar X-ray flares and proton event forecasting, Adv. Space Res., doi:10.1016/j.asr.2008.08.011, 2008.
- Cliver, E.W., Kahler, S.W., Shea, M.A., and Smart, D.F. Injection onsets of ~2 GeV protons, ~1 MeV electrons, and ~100 keV electrons in solar cosmic ray flares. // Phys. J. V.260. P.362. 1982.
- Cliver, E.W. The Unusual Relativistic Solar Proton Events of 1979 August 21 and 1981 May 10 // Astrophysical Journal. V. 639. № 2. P. 1206. 2006.
- Gentile L.C., Shea M. A. and Smart D. F. Problems Associated with the Cataloging of Neutron Monitor Data for Ground-Level Solar Cosmic Ray Events // Proc. 21st ICRC. V. 5. P. 148. 1990.
- Gopalswamy N., Xie, H., Yashiro, S. and Usoskin I. Coronal Mass Ejections and Ground Level Enhancements // ICRC29. V. 1. P.169. 2005.
- Gopalswamy N., Xie, H., Yashiro, S. and Usoskin I. Ground Level Enhancements of solar cycle 23// Indian Journal of Radio & Space Physics. V. ?. P. ?. 2008.
- Grechnev, V.V.; Kurt, V.G.; Chertok, I.M.; Uralov, A.M.; Nakajima, H.; Altyntsev, A.T.; Belov, A.V.; Yushkov, B.Yu.; Kuznetsov, S. N.; Kashapova, L.K.; Meshalkina, N.S., Prestage N.P. An Extreme Solar Event of 20 January 2005: Properties of the Flare and the Origin of Energetic Particles // Solar Physics. V. 252. №1. P.149. 2008.
- Kane, S.R.; McTiernan, J.; Loran, J.; Fenimore, E.E.; Klebesadel, R.W.; Laros, J.G. Stereoscopic observations of a solar flare hard X-ray source in the high corona // Astrophysical Journal. Part 1 (ISSN 0004-637X). V. 390. No.2. P. 687. 1992.
- McCracken, K.G., Moraal, H., and Stoker P.H. Investigation of the multiple-component structure of the 20 January 2005 cosmic-ray ground level enhancement // JGR. V. 113, Issue A12, CiteID A12101, 2008.
- Miroshnichenko L I. Solar Cosmic Rays // Kluwer Academic Publishers, 2001.
- Osokin, A.R., Livshits, M.A., Belov, A.V. Sources of efficient acceleration of solar flare particles: Observational aspects // Astronomy Reports. V. 51. No7. P.577-587. 2007

- *Perez-Peraza J., Vashenyuk E.V., Gallegos-Cruz A., Balabin Yu.V., Miroshnichenko L.I.*, Relativistic proton production at the Sun in the January 20, 2005 event // *Adv. Space Res.* V.41. P. 947–954. 2008
- *Plainaki, C., Belov, A., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Yanke, V.* Modeling ground level enhancements: Event of 20 January 2005 // *Journal of Geophysical Research.* V.112. No A4. CiteID A04102. 2007
- *Plainaki, C.; Belov, A.; Eroshenko, E.; Mavromichalaki, H.; Yanke, V.*, Modeling the solar cosmic ray event of 13 December 2006 using ground level neutron monitor data // *Adv. Space Res.* V.41. doi:10.1016/j.asr.2008.07.011. 2008
- *Shea, M.A.* Solar cosmic rays, 1960-1989 // *Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf.* V. 12. P.196. 1990
- *Shea, M.A. and Smart D.F* A Summary of major solar proton events // *Solar Phys.* V.127. P. 297. 1990
- *Shea M. A. and Smart D. F.* A Comparison of Energetic Solar Proton Events During the Declining Phase of Four Solar Cycles (Cycles 19-22) // *JASR.* V. 16. No9. P. 37. 1995.
- *Shea, M.A., Smart, D.F.* The heliolongitudinal distribution of solar flares associated with solar proton events // *Adv. Space Res.* V.17. No2. P.113-116. 1996.
- *Sladkova A. I., Bazilevskaya G.A., Ishkov V.N. et al.* Catalogue of Solar Proton Events 1987-1996, ed. Yu. I. Logachev. Moscow University Press. 300 P. 1998.
- *Smart, D.F. and Shea, M.A.* A comparison of the magnitude of the 29 September 1989 high energy event with solar cycle 17, 18 and 19 events // *Proc. of ICRC22.* V. 3. P. 101. 1991.
- *Smart, D.F. and Shea, M.A.*, The local time dependence of the anisotropic solar cosmic ray flux // *Advances in Space Research.* V. 32. No1. P. 109-114. 2003.
- *Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A., Miroshnichenko L.I.* Some features of relativistic particles at the Sun in the solar cycles 21-23 // *Adv. Space Res.* [V. 38](#). P. 411-417. 2006.

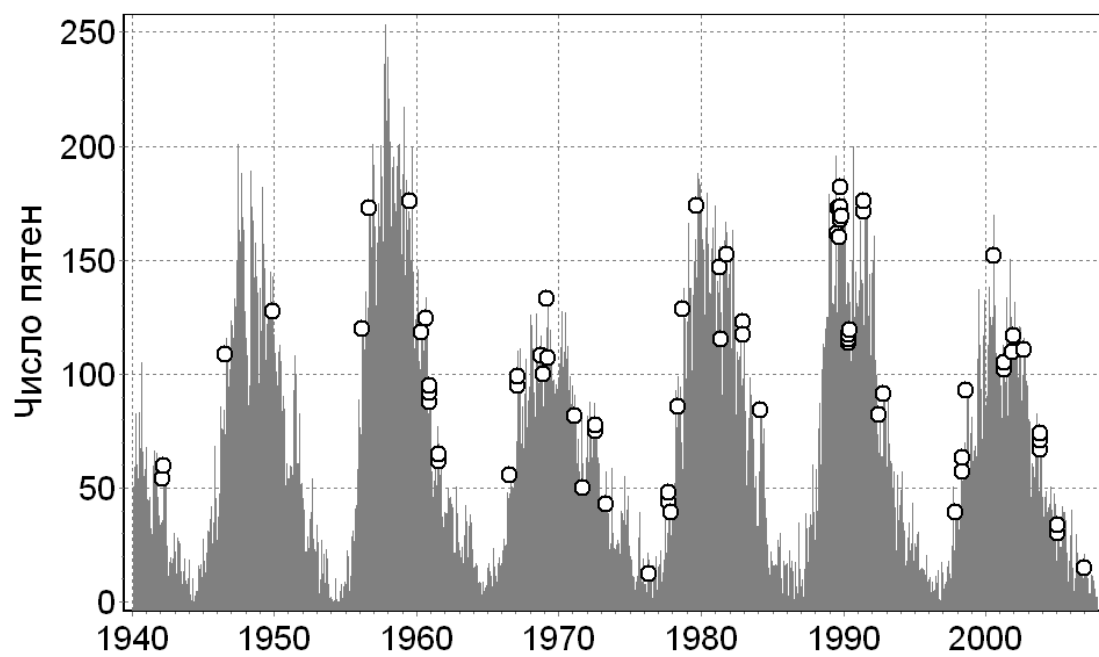


Рис. 1. А.В.Белов и др. Наземные возрастания...

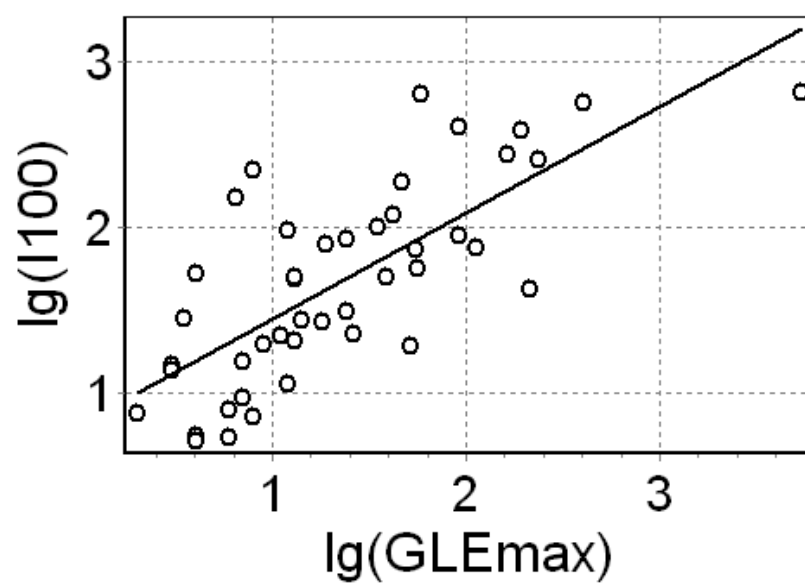


Рис. 2. А.В.Белов и др. Наземные возрастания...

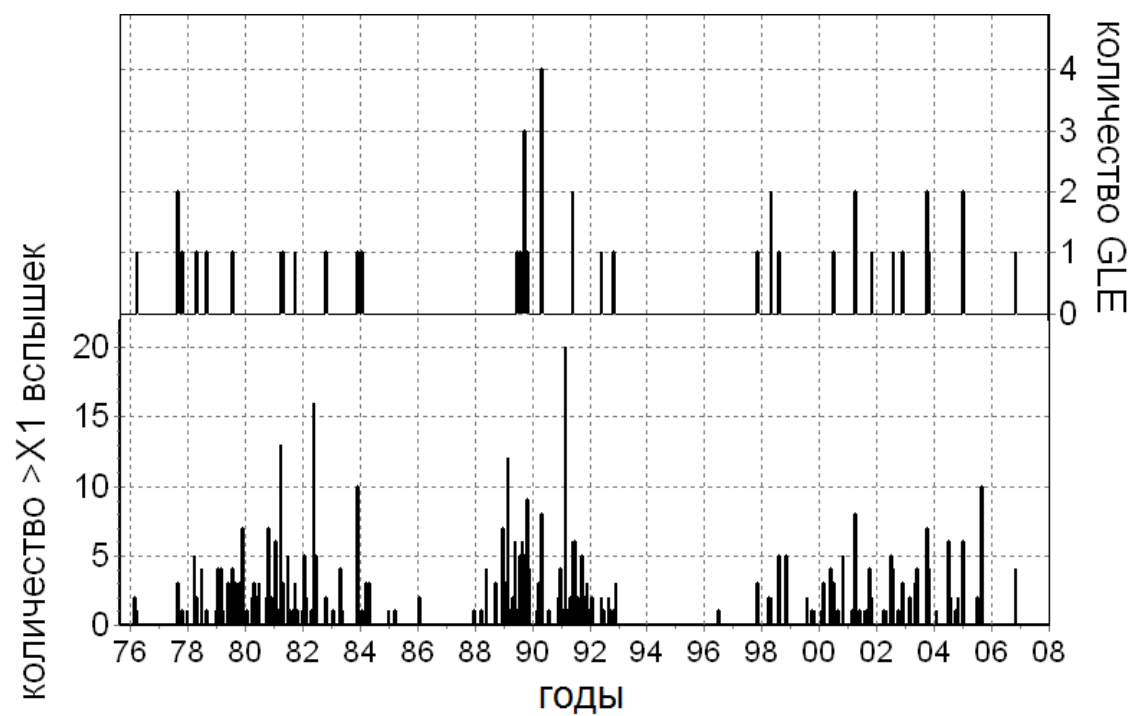


Рис. 3. А.В.Белов и др. Наземные возрастания...

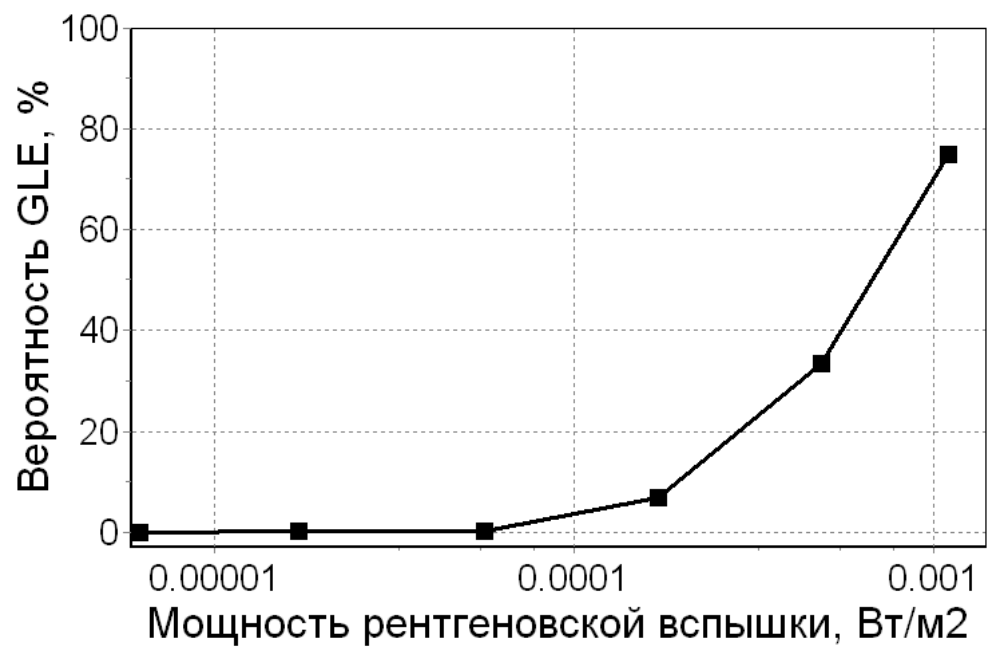


Рис. 4. А.В.Белов и др. Наземные возрастания...

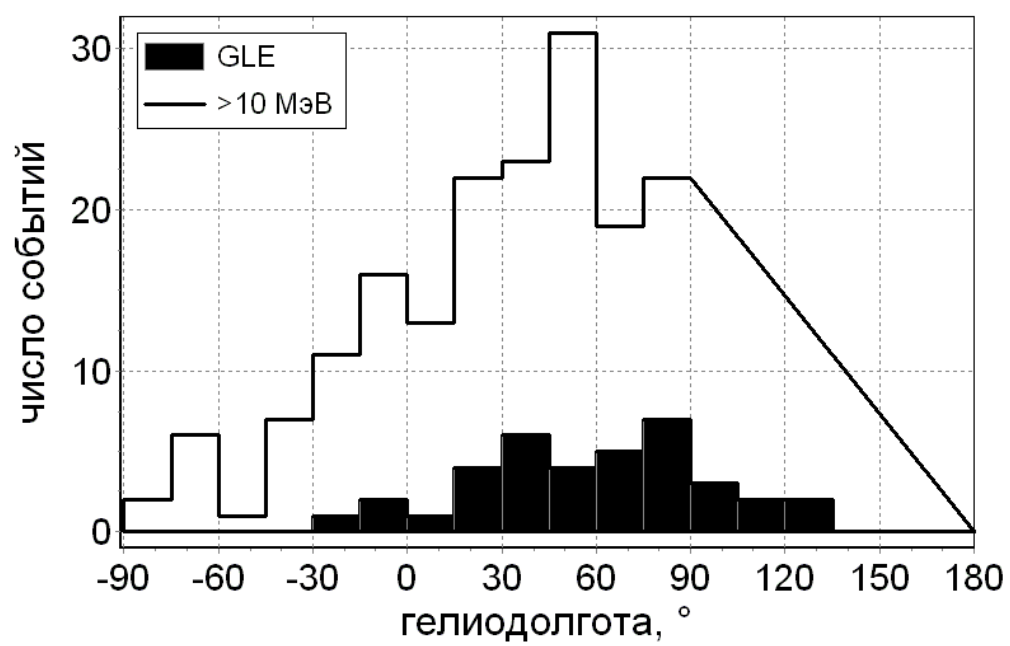


Рис. 5. А.В.Белов и др. Наземные возрастания...

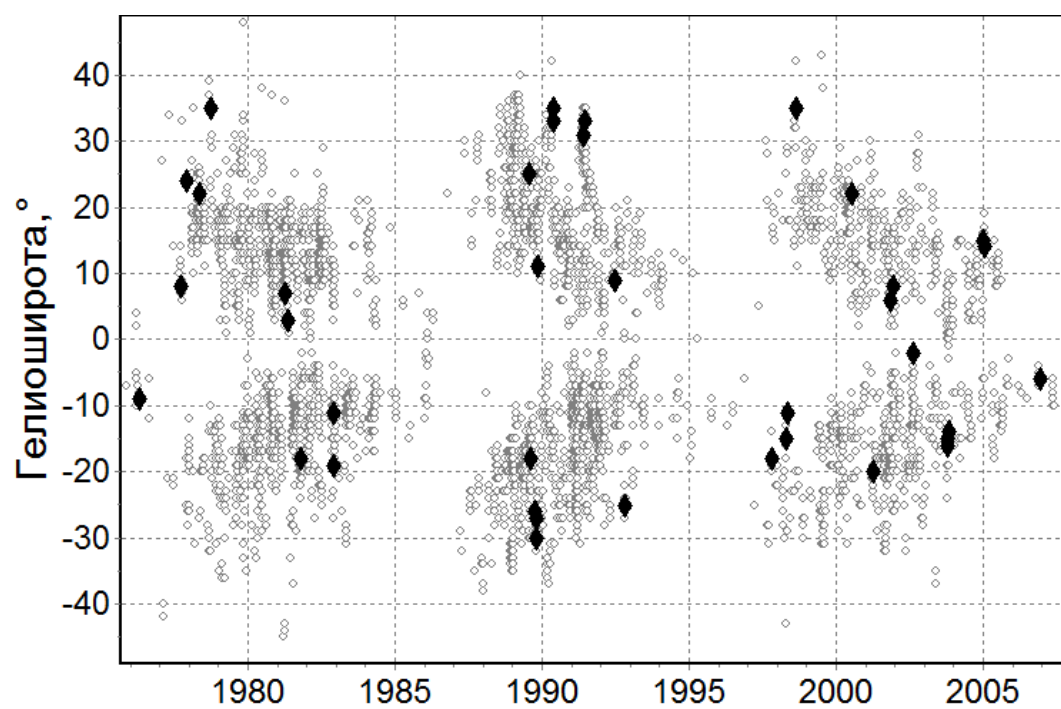


Рис. 6. А.В.Белов и др. Наземные возрастания...

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Среднемесячные числа солнечных пятен в семи последних циклах солнечной активности и моменты всех известных наземных возрастаний солнечных космических лучей.

Рис. 2. Взаимозависимость максимальных интегральных потоков протонов с энергией >100 МэВ и максимальных возрастаний скорости счёта нейтронных мониторов в одних и тех же событиях 1976-2006 гг. Прямая соответствует регрессионной степенной зависимости.

Рис. 3. Изменения годовых количеств мощных ($>X1$) рентгеновских солнечных вспышек и наземных возрастаний солнечных КЛ в 1976-2007 гг.

Рис. 4. Вероятность наблюдения наземного протонного возрастания после вспышек с различной мощностью в мягком (1-8 Å) рентгене, наблюдавшихся в благоприятной долготной зоне W0-W80.

Рис. 5. Распределение по гелиодолготе числа вспышек 1975-2007 гг., связанных с наземными протонными возрастаниями (GLE) и протонными возрастаниями с максимальным потоком протонов >10 pfu для частиц с энергией >10 МэВ.

Рис. 6. Гелиошироты и моменты наблюдения всех рентгеновских вспышек с баллом $\geq M1$ (светлые кружки) и вспышек, связанных с наземными возрастаниями солнечных КЛ (ромбы).

А. В. Белов	496 751-09-24
Е. А. Ерошенко	496 751-09-25
О. Н. Крякунова	727 2 54-06-40
В. Г. Курт	939-31-39
В. Г. Янке	496 751-09-25

Таблица 1. Наземные возрастания солнечных КЛ в 1976-2006 гг.

GLE	Дата	Вспышка			Активная область		Максимальное возрастание на нейтронных мониторах			Максимальный поток протонов, pfu (IMP, GOES)	
		Балл	Время начала и максимума	Координаты	Номер	Макс. площадь	Возрастание, %	Время	Станция КЛ	>10 МэВ	>100 МэВ
27	1976.04.30	X2.0/2B	20:48-21:08	S09W47	700	250	4	22:00-22:05	OULU	170	52
28	1977.09.19	X2.0/3B	10:28-10:38	N08W58	889	1100	3	11:50-11:55	OULU	200	1.7
29	1977.09.24	/	??:??-5:55 ^a	N10W116	889	1100	11	08:00-09:00	SOPO	81	22
30	1977.11.22	X1.0/2N	10:26-??:??	N24W38	939	440	55	10:42-10:48	SOPO	300	73
31	1978.05.07	X2.0/2B	03:33-??:??	N22W68	1095	1150	214	03:40-03:45	KERG	213	42
32	1978.09.23	X1.0/3B	9:47-10:29	N35W50	1294	1120	13	11:00-12:00	SOPO	2250	48
33	1979.08.21	C6.0/1B	06:11-06:13	N15W38	1926	90	9	06:30-06:35	GSBY	274	19
34	1981.04.10	X2.5/3B	16:32-17:03	N07W35	3025	310	2	18:05-18:10	ALRT	55	7.5
35	1981.05.10	M1.3/2B	07:12-07:31	N03W75	3079	470	3	08:30-08:35	CALG	180	13.5
36	1981.10.12	X3.1/3B	06:22-06:36	S18E30	3390	1630	18	09:10-09:12	SOPO	590 ^b	26
37	1982.11.26	X4.5/2B	02:30-02:37	S11W87	3994	1680	6	04:00-05:00	SOPO	161	7.8 ^b
38	1982.12.07	X2.8/1B	00:00-00:05	S19W82	4007	780	56	04:00-05:00	KERG	900	56
39	1984.02.16	C2.3/	07:36-07:43	S16W94	4408	300	212	09:12-09:14	SOPO	165 ^b	75
40	1989.07.25	X2.6/2N	08:39-08:43	N25W84	5603	180	8	09:38-09:40	SOPO	30	7
41	1989.08.16	X20/2N	01:08-01:17	S18W84	5629	1250	24	02:52-02:54	SOPO	1500	84
42	1989.09.29	X9.8/	10:47-11:33	S26W100	5698	1180	404	12:55-13:00	CALG	4500	560
43	1989.10.19	X13/4B	12:29-12:45	S27E10	5747	1100	92	16:22-16:24	SOPO	2360	400
44	1989.10.22	X2.9/2B	17:08-17:57	S27W31	5747	1100	193	18:06-18:08	MCMD	4450	380
45	1989.10.24	X5.7/3B	17:36-18:31	S30W57	5747	1100	162	19:58-20:00	SOPO	5000	270
46	1989.11.15	X3.2/3B	06:38-07:05	N11W26	5786	510	12	07:10-07:15	TERA	72	11
47	1990.05.21	X5.5/2B	22:12-22:17	N35W36	6063	790	24	22:46-22:48	THUL	276	31
48	1990.05.24	X9.3/1B	20:46-20:49	N33W78	6063	790	52	21:14-21:15	MTWL	96	19
49	1990.05.26	X1.4/	20:45-20:58	N33W104	6063	790	13	00:38-00:40	SOPO	68	20
50	1990.05.28	C9.7/	05:15-05:21	N33W120	6063	790	6	10:30-10:32	SOPO	29 ^b	5.3
51	1991.06.11	X12/3B	02:09-02:29	N31W17	6659	2200	12	04:12-04:14	SOPO	2300 ^b	95 ^b

52	1991.06.15	X12/3B	08:08-08:31	N33W69	6659	2200	42	10:00-10:02	SOPO	950	116
53	1992.06.25	X3.9/2B	19:47-20:11	N09W67	7205	1080	7	20:50-20:55	TXBY	255	15 ^b
54	1992.11.02	X9.0/	02:31-03:08	S25W100	7321	1580	6.5	05:30-05:32	SOPO	630 ^b	150
55	1997.11.06	X9.4/2B	11:49-11:55	S18W63	8100	890	19	13:34-13:36	SOPO	380	78
56	1998.05.02	X1.1/3B	13:31-13:42	S15W15	8210	450	7	14:05-14:10	OULU	150	9.2
57	1998.05.06	X2.7/1N	07:58-08:09	S11W65	8210	450	4 ^d	09:30-09:35	OULU	210	5.4
58	1998.08.24	X1.0/3B	21:50-22:12	N35E09	8307	500	4 ^c	23:30-23:35	CAPS	200	5.1
59	2000.07.14	X5.7/3B	10:03-10:24	N22W07	9077	1000	59	11:52-11:53	SOPO	8400	623
60	2001.04.15	X14/2B	13:19-13:50	S20W85	9415	830	237	14:34-14:35	SOPO	950	250
61	2001.04.18	C2.2/	02:11-02:14	S20W115	9415	830	26	03:34-03:35	SOPO	320	23
62	2001.11.04	X1.0/3B	16:03-16:20	N06W18	9684	510	8	18:06-18:07	SOPO	31700	220
63	2001.12.26	M7.1/1B	04:32-05:40	N08W54	9742	1060	13	06:20-06:21	SOPO	800	50
64	2002.08.24	X3.1/1F	00:49-01:12	S02W81	10069	1960	14	01:51-01:52	SOPO	220	27
65	2003.10.28	X17/4B	09:51-11:10	S16E08	10486	2370	47	11:52-11:53	MCMD	29500	186
66	2003.10.29	X10/2B	20:37-20:49	S15W02	10486	2370	35	21:30-21:31	SOPO	2300	107
67	2003.11.02	X8.3/2B	17:03-17:25	S14W56	10486	2370	39	17:51-17:52	SOPO	1560	49
68	2005.01.17	X3.8/3B	06:59-09:52	N15W25	10720	1610	3.5	11:29-11:30	SOPO	4900	28
69	2005.01.20	X7.1/2B	06:36-07:01	N14W61	10720	1610	5400	06:53-06:54	SOPO	1800	650
70	2006.12.13	X3.4/4B	02:14-02:40	S06W23	10730	680	92	03:05-03:10	OULU	700	89

Примечания: а) нет рентгеновских наблюдений, оптическая вспышка отсутствовала, время радиовсплеска типа II; б) неполные данные о потоках протонов; с) неполные данные наземных наблюдений КЛ.

Таблица 2. Некоторые характеристики наземных возрастных СКЛ в 21-23 циклах солнечной активности

Цикл	Годы	К-во GLE	Средняя величина GLE, %	Средняя мощность вспышки, 10^{-4} Вт/м ²
21	1976-1985	12	15±6	1.0±0.4

22	1986-1995	15	28±10	6.6±1.4
23	1996-2007	16	28±13	3.9±1.0

Таблица 3. Средние характеристики вспышек связанных с наземными возрастаниями, и вспышек, связанных с большими протонными, но не наземными возрастаниями.

Характеристика протонных событий и ассоциированных вспышек	Вспышки, связанные с GLE	Вспышки, связанные с $J_{100}>2$ pfu, но не с GLE
Количество	36	32
Мощность вспышки, Вт·м ⁻²	$(3.2 \pm 0.6) 10^{-4}$	$(2.0 \pm 0.5) 10^{-4}$
Продолжительность вспышки, мин	96 ± 19	123 ± 21
Продолжительность фазы роста вспышки, мин	28 ± 5	25 ± 4
Гелиодолгота вспышки, °	43 ± 5	18 ± 10
Разница широт Земли и вспышки, $\Delta\lambda^\circ$	18.5 ± 1.8	18.6 ± 1.4
$J_{10,\text{pfu}}$	640 ± 190	240 ± 100
$J_{100,\text{pfu}}$	50 ± 11	6.1 ± 1.3
γ	1.11 ± 0.07	1.60 ± 0.09