

МНОЖЕСТВЕННЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ДЕКАМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ОТ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Предмет и цель работы: Исследование эффектов влияния солнечной и геомагнитной активности на состояние верхней атмосферы Земли методом “просвечивания” ее излучением космических радиоисточников.

Методы и методология: Мониторинг потоков излучения мощных галактических и внегалактических радиоисточников проводится на радиотелескопе “УРАН-4” Одесской обсерватории Радиоастрономического института НАН Украины с 1987 г. и по настоящее время. В программу мониторинга включены радиогалактики 3C274, 3C405 и остатки сверхновых 3C144, 3C461. Изменения потоков излучения радиоисточников на дециметровых волнах определяются состоянием ионосферы под воздействием космической погоды.

Результаты: Рассмотрены модели множественной корреляционной зависимости потоков излучения радиоисточников от факторов, формирующих космическую погоду. Модели составлялись для периодов экстремальных проявлений солнечной и геомагнитной активности. Независимые переменные разделены на три группы: индексы, характеризующие солнечную активность; потоки частиц; компоненты магнитного поля. Рассчитано более 60 вариантов модели множественной корреляционной зависимости. Полученные значения множественного коэффициента корреляции находятся в интервале $0.86 \div 0.99$. Наибольшие вклады в множественный коэффициент корреляции дают радиоизлучение Солнца на волне 10.7 см (F10.7), площадь пятен (Sp), поток электронов (E) и поток протонов (P).

Заключение: Мониторинг потоков излучения космических радиоисточников, проводимый на радиотелескопе “УРАН-4”, позволяет “просвечивать” ионосферу Земли над радиотелескопом и определяет интегральный эффект воздействия на нее солнечной и геомагнитной активности. Большой объем данных наблюдений на радиотелескопе “УРАН-4” дает возможность детально изучать проявления эффектов космической погоды в ионосфере, что будет осуществлено в последующих работах.

Ключевые слова: верхняя атмосфера, солнечная активность, геомагнитная активность, космическая погода

1. Введение

В опубликованной ранее работе [1] представлены результаты длительного мониторинга потоков излучения мощных галактических и внегалактических радиоисточников, проводимого на радиотелескопе “УРАН-4” Одесской обсерватории Радиоастрономического института НАН Украины с момента ввода его в эксплуатацию в 1987 г.

В программу мониторинга входят остатки сверхновых Кассиопея А (3C461), Телец А (3C144) и радиогалактики Лебедь А (3C405) и Дева А (3C274). Наблюдения радиоисточников проводились отдельными сеансами, в пределах ± 2 ч до и после времени кульминации источников. Время прохождения радиоисточников 3C144, 3C274, 3C405 через диаграмму направленности составляло 40 мин (для каждого часо-

вого угла), для радиоисточника 3C461 – 60 мин. В целом общее время суточного мониторинга превышало 13 ч. Таким образом, в результате мониторинга потоков излучения радиоисточников получены данные наблюдений в различное время суток (рис. 1) и при различных состояниях солнечной активности. Описание метода обработки данных мониторинга дано в работе [2].

Мониторинг потоков космических радиоисточников, проводимый на радиотелескопе “УРАН-4”, позволяет “просвечивать” ионосферу Земли над радиотелескопом и определяет интегральный эффект воздействия на нее солнечной и геомагнитной активности.

2. Построение моделей множественной корреляционной зависимости

К использованию методов статистики в радиоастрономии приходится прибегать тогда, когда,

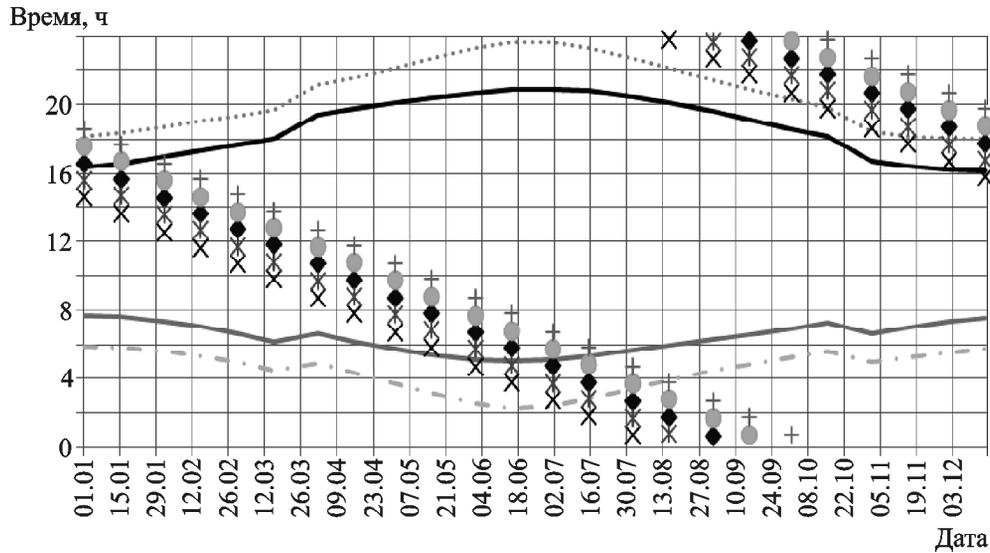


Рис. 1. Время наблюдений радиостанции 3С461 на разных часовых углах: × – -120° ; * – -60° ; ◆ – 0° ; ● – 60° ; (нижняя сплошная кривая – восход Солнца, верхняя сплошная кривая – заход Солнца)

с одной стороны, имеется достаточно много наблюдений какого-либо типа источников, а с другой стороны, наблюдается противоречие в анализе причин, вызывающих изменение их параметров.

Исследование многообразных зависимостей параметров источников от влияющих факторов предполагает выбор такой методики обработки наблюдений, которая может выделить наиболее общие зависимости.

Обычный метод с использованием парной линейной зависимости оказывается недостаточным, поскольку, изучая влияние одного фактора, мы не учитываем влияния остальных. Кроме того, расчет параметров парных корреляции и регрессии не дает количественной меры воздействия всех факторов на исследуемую величину.

Более эффективным оказывается использование множественного корреляционного анализа. Здесь мы прибегаем к построению корреляционной модели, в которой исследуются различные показатели степени тесноты связи между рассматриваемой переменной и влияющими факторами.

Прежде чем приступить к построению эмпирической корреляционной модели, следует учитывать некоторые условия, а именно:

– модель должна включать, по возможности, полную группу влияющих факторов, которые под-

бираются на основе отдельных наблюдений и физических соображений;

– факторы, входящие в модель, не должны быть взаимно коррелированными и дублирующими друг друга.

Пусть результаты наблюдений представляют собой N различных значений зависимой переменной X_0 . Каждому значению зависимой переменной X_0 ставится в соответствие значение набора факторов X_1, X_2, \dots, X_n . В предположении линейной зависимости методом наименьших квадратов определяется вид уравнения:

$$X_0 = a + b_{01.23\dots n}X_1 + b_{02.13\dots n}X_2 + \dots + b_{0n.23\dots n-1}X_n,$$

где a – постоянный член, $\beta_{0i.12\dots k}$ – коэффициент регрессии.

Когда факторы имеют различные единицы измерения, коэффициенты регрессии непосредственно несопоставимы. Поэтому для определения степени зависимости более пригодны так называемые бета-коэффициенты, которые вычисляем по формуле

$$\beta_{0i} = \beta_{0i.12\dots k} \frac{\sigma_0}{\sigma_i}.$$

Здесь σ_0 – среднеквадратичное отклонение наблюдаемых значений зависимой переменной от его

среднего, σ_i – среднеквадратичное отклонение i -го фактора от среднего.

Как следует из формулы, бета-коэффициенты показывают, на какую долю среднеквадратичного отклонения изменится зависимая переменная при изменении фактора на одно среднеквадратичное отклонение.

Теснота связи между исследуемой переменной и влияющими на нее факторами характеризуется множественным коэффициентом корреляции. Значение его находим из выражения

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{0.12\dots n}^2}{\sigma_0^2}},$$

где $\sigma_{0.12\dots n}^2$ – среднеквадратичное отклонение фактических значений зависимой переменной от вычисленных по уравнению регрессии.

Количественную меру влияния какого-либо фактора определяет коэффициент отдельного определения d_{0i} , который вычисляется по формуле

$$d_{0i}^2 = \frac{b_{0i.12\dots n} C_{0i}}{\sigma_{0.12\dots n}^2}.$$

Числитель в этой формуле есть произведение коэффициентов регрессии $b_{0i.12\dots n}$ и одного из факторов C_{0i} , который находим из выражения

$$C_{0i} = \frac{\sum X_0 X_i}{K} = \bar{X}_0 \bar{X}_{0i},$$

где \bar{X}_0 , \bar{X}_{0i} – средние значения зависимой переменной и фактора соответственно, K – число наблюдений.

Контролем правильности расчетов d_{0i}^2 может служить формула:

$$R^2 = d_{01}^2 + d_{02}^2 + \dots + d_{0n}^2.$$

Коэффициент отдельного определения дает количественную меру влияния данного фактора при условии, что другие сохраняют постоянные значения. Квадрат коэффициента множественной корреляции R^2 в свою очередь показывает, какая доля вариации независимой переменной определяется совместным влиянием факторов, входящих в модель.

Другим показателем раздельного влияния является коэффициент частной корреляции r_{0i}^2 . Он

определяет долю влияния каждого фактора при элиминировании (исключении) влияния остальных. Значения его, например для первого фактора, определяется по формуле

$$r_{0i}^2 = \frac{\sigma_{0.23\dots n}^2 - \sigma_{0.12\dots n}^2}{\sigma_{0.23\dots n}^2}.$$

Здесь $\sigma_{0.23\dots n}^2$ – среднеквадратичное отклонение наблюдаемых значений зависимой переменной от вычисленных по уравнению, в расчете которого участвовали все факторы, кроме первого.

К использованию частного коэффициента в анализе корреляционной модели следует подходить с осторожностью в связи с тем, что он может служить объективным показателем только тогда, когда известна полная группа влияющих факторов, и при большом числе наблюдений.

Улучшения качества модели следует добиваться по значениям параметров b_{0i} , d_{0i} , R . Одним из путей улучшения модели является учет нелинейной зависимости между зависимыми и независимыми переменными [3].

Применяя существующие методы линейаризации зависимостей, получаем новые значения коэффициентов регрессии. Найденные таким образом модели назовем альтернативными, поскольку они не являются единственными. Это объясняется тем, что между разнородными физическими параметрами существуют статистические связи и они не могут быть введены в одну модель.

На основе альтернативных моделей возможно построение сводной модели, которая будет включать наиболее полную группу факторов.

Способ построения свободных моделей заключается в том, что составляется уравнение множественной зависимости, в которое входят факторы с коэффициентами регрессии, полученные из данных альтернативных моделей.

Свободный член уравнения регрессии сводной модели a_{cb} [3] определяется из равенства

$$X_0 - (b_{1a} \bar{X}_1 + b_{2a} \bar{X}_2 + \dots + b_{na} \bar{X}_{1n}) = a_{cb},$$

где b_{1a} , b_{2a} , ..., b_{na} – коэффициенты регрессии, полученные из альтернативных моделей; \bar{X}_1 , \bar{X}_2 , ..., \bar{X}_n – средние значения зависимых и независимых переменных. На основании этого урав-

нения ведется дальнейший расчет показателей зависимости.

В качестве зависимой переменной рассматривались потоки излучения радиоисточников. Данные были разбиты на периоды, соответствующие одному месяцу. В работе исследовались периоды экстремальных проявлений космической погоды. Экстремальные проявления космической погоды представляют собой целый комплекс явлений, вызванных вспышками на Солнце или корпускулярными потоками от корональных дыр, выбросами намагниченной корональной плазмы, потоками электронов и протонов в околоземном пространстве и последующими магнитными бурями.

В качестве независимых переменных для всех периодов исследования применялся следующий набор факторов.

1. В качестве индексов, характеризующих солнечную активность, использовались независимые переменные [4, 6–9]:

– $F10.7$ (Radio Flux 10.7cm) – поток солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см, выраженный в солнечных единицах потока (с. е. п.), – коррелирует с потоками ультрафиолетового и рентгеновского ионизирующими излучениями, оказывающими влияние на состояние ионосферы; в изменении индекса отражается эволюция всего комплекса солнечной активности, включающего группы пятен, флоккулы и проявления вспышечной активности;

– S_p (Sunspot Area) – площадь солнечных пятен в миллионных долях площади видимой солнечной полусферы – отражает величину магнитного потока, сосредоточенного в пятнах (учитывались индексы по всему диску Солнца);

– W – числа Вольфа формула для расчета числа пятен, предложенная Р. Вольфом имеет вид:

$$R = k(10g + s),$$

где R – число пятен, g – количество групп пятен, s – сумма одиночных пятен в группах, k – нормировочный коэффициент.

2. В качестве корпускулярных индексов использовались

– P – потоки протонов с энергиями более 1; 10; 100 МэВ;

– E – потоки электронов с энергиями более 0.6; 2 МэВ;

– плотность ρ и скорость v солнечного ветра на орбите Земли (АСЕ-2).

3. В качестве индексов, характеризующих состояние геомагнитной активности, применялись

– K -индекс, характеризующий возмущенное состояние магнитного поля Земли (использовались данные магнитной обсерватории “Одесса”, расположенной недалеко от радиотелескопа “УРАН-4”);

– основные компоненты магнитного поля: горизонтальная составляющая H , вертикальная составляющая Z и склонение D , (по данным магнитной станции “Одесса”).

Расчет уравнения множественной регрессии проводился методом наименьших квадратов с использованием пакета STATISTICA-7 [3].

Подбор и расчеты моделей осуществлялись с учетом взаимной корреляции независимых переменных, т. к. в противном случае возникает проблема неопределенности в оценках. На первом этапе определялась мера зависимости зависимых и независимых переменных (коэффициент корреляции), а затем применялся метод пошагового множественного регрессионного анализа. К примеру, такие характеристики, как поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, $F10.7$, и площадь пятен, S_p , взаимосвязаны между собой и имеют высокий коэффициент корреляции (см. рис. 2). Поэтому эти индексы вносились в разные модели для расчетов множественной регрессии.

Построение корреляционных моделей проводилось для экстремальных событий 23-го цикла солнечной активности. Представлены данные для следующих периодов наблюдения космичес-

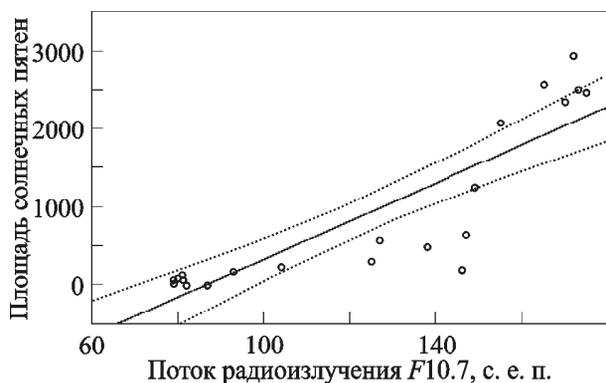


Рис. 2. Графическое представление взаимной корреляции между радиоизлучением Солнца и площадью пятен в июле 2004 г. (пунктирные линии – 95 % доверительный интервал)

кой погоды: ноябрь 2003 г., июль 2004 г., август 2005 г.

3. Описание рассматриваемых периодов наблюдения

Рассмотрим самый экстремальный период космической погоды 23-го цикла солнечной активности – ноябрь 2003 г. Изменения потока излучения радиосточника 3С461 в этот период показаны на рис. 3. Видны небольшое уменьшение потока 3–5 ноября и наиболее заметное уменьшение с 17 по 27 ноября, которое отмечается на всех часовых углах. В период с 2 по 4 ноября уровень пятнообразовательной активности Солнца продолжал оставаться на высоком уровне, на Солнце произошло 4 вспышки. Наиболее мощная вспышка в рентгеновском диапазоне класса $X > 17.5$ произошла 4 ноября и привела к спаду уровня потока радиосточника (рис. 3). Спад потока радиосточника оказался не слишком большим, поскольку вспышка произошла на краю солнечного диска и ее излучение слабо повлияло на Землю. Свидетельством этому стало отсутствие в последующем магнитной бури. Следующий период повышенной солнечной и геомагнитной активности начался 17 ноября. Он сопровождался резким спадом уровня потока радиосточника, который продолжился до 27 ноября (рис. 3). За трое суток в активной области произошло во-

семь вспышек класса М, две из которых были большими. Наиболее интересным событием этого периода была вспышка класса 2N 18 ноября, за время которой произошли две вспышки класса М3.2 и М3.9, (см. табл. 1). Мощный выброс коронального вещества этого вспышечного события вызвал в околоземном космическом пространстве очень большую и интенсивную магнитную бурю 20–21 ноября. Всего в ноябре наблюдалось 4 вспышки класса X, 20 вспышек класса М и пять выбросов солнечных волокон.

Изменение потока радиосточника 3С274 в июле 2004 г. изображено на рис. 4. В период с 14 по 21 июля пятнообразовательная активность достигла высокого уровня. Уже 11 июля в западной части полусферы Солнца на севере образовалась небольшая группа пятен, которая всплывала столь быстро, что уже на третий и четвертый день существования, за 29 ч, в ней произошли четыре большие вспышки класса М. Однако все они не оказали заметного влияния на околоземное космическое пространство и воздействовали только на ионосферу дневной стороны Земли, вызывая внезапные ионосферные возмущения средней интенсивности. 11 июля на видимый диск Солнца вышла активная область южного полушария Солнца, которая в период с 13 по 17 июля произвела 6 вспышек класса X и 10 вспышек класса М, причем среди последних не было ни одной большой вспышки.

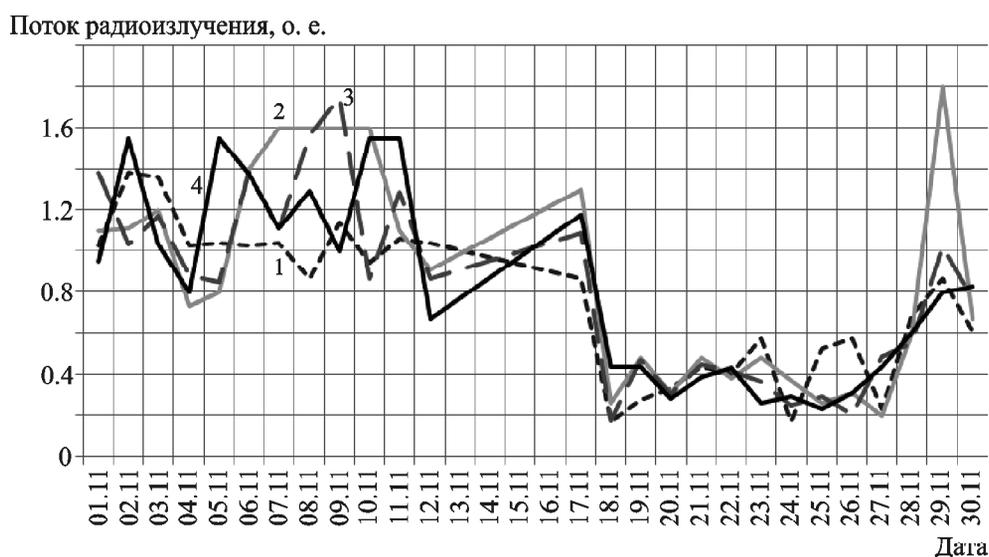


Рис. 3. Вариации потока излучения радиосточника 3С461 (поляризация – А, частота – 25 МГц) в ноябре 2003 г. на разных часовых углах: 1 – -60° ; 2 – 0° ; 3 – 60° ; 4 – 120°

Таблица 1. Наиболее значительные и геоэффективные солнечные вспышки и вызванные ими явления в околоземном космическом пространстве в ноябре 2003 г.

Дата	Начало UT	Длительность, мин	Координаты φ, λ	Класс	Магнитные бури
02.11.2003	17:03	171	S14, W56	X8.3/2B	ММБ
03.11.2003	01:06	91	N10, W83	X2.7/2B	–
03.11.2003	09:43	> 36	N08, W77	X3.9/2F	–
04.11.2003	19:29	80	S19, W83	X > 17.5 (1 ^m)	–
05.11.2003	10:46	> 12	S16, W90	M5.3/SF	–
18.11.2003	07:16	159	N00, E18	2N/M3.2/M3.9	ОБМБ
20.11.2003	07:35	61	N01, W08	M9.6/2B	–
20.11.2003	23:42	16	N00, W17	M5.8/2N	–

Примечание: Рентгеновский класс вспышек: М – интенсивность вспышки в пике от 10^{-5} до 10^{-4} Вт/м², Х – интенсивность вспышки в пике больше 10^{-4} Вт/м² (цифра после буквы – значение интенсивности в Вт/м²); оптический балл вспышек: F – слабая, N – нормальная, В – яркая (цифра перед буквой характеризует площадь вспышки); φ – гелиографическая широта, λ – угловое расстояние от центрального меридиана; ММБ – малая магнитная буря, ОБМБ – очень большая магнитная буря.

Поток радиоизлучения, о. е.

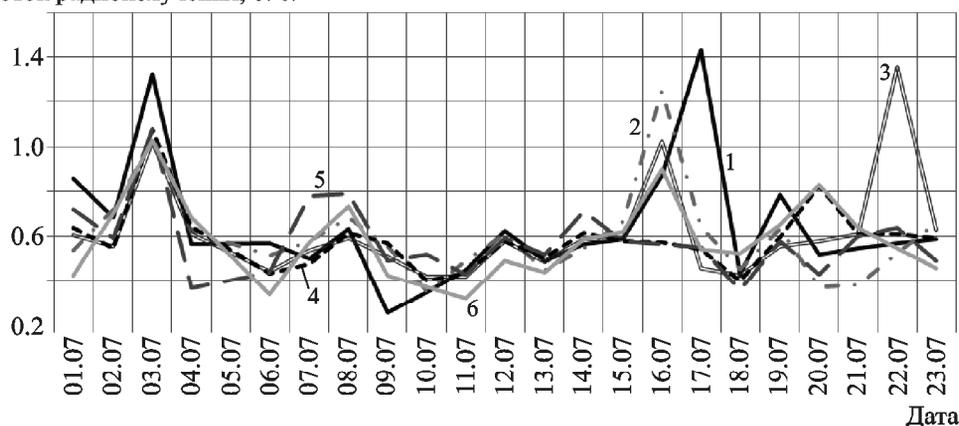


Рис. 4. Вариации потока излучения радиоисточника 3С274 (поляризация – А, частота – 25 МГц) в июле 2004 г. на различных часовых углах: 1 – -160° ; 2 – -120° ; 3 – -80° ; 4 – -40° ; 5 – 0° ; 6 – 40°

Все эти вспышки вызвали внезапные ионосферные возмущения на дневной стороне Земли и одну малую магнитную бурю 17 июля. Наиболее значительные и геоэффективные солнечные вспышки и вызванные ими явления в околоземном космическом пространстве отображены в табл. 2.

Рассмотрим изменения потока излучения радиоисточника 3С461 в экстремальный период солнечной активности – в августе 2005 г. Изменения потока радиоисточника в этот период показаны на рис. 5.

Пятнообразовательная активность Солнца в августе 2005 г. менялась от низкого уровня в

начале месяца до среднего в течение всей второй декады и опять к низкому в конце месяца. На видимом диске Солнца постоянно наблюдались 1–2 группы пятен, одна из них была большой. Максимальное относительное число пятен $W = 69$ наблюдалось 14 августа, а минимальное $W = 16$ – 7 августа. 22–23 августа за 38 часов активная область произвела 3 протонных вспышки класса М2.6 и М5.6 (22 августа), а также М2.7 (23 августа). На графике этот период отмечается повышением уровня (см. рис. 5). Это связано с обратной корреляционной зависимостью между потоками протонов и потоком излучения радиоисточника. Кроме того, 25 августа

Таблица 2. Наиболее значительные и геоэффективные солнечные вспышки и вызванные ими явления в околоземном космическом пространстве в июле 2004 г.

Дата	Начало UT	Длительность, мин	Координаты φ, λ	Класс	Магнитные бури
13.07.2004	00:09	> 14	N14, W45	M6.7/1B	–
13.07.2004	08:40	36	N12, W52	M5.4/1N	–
13.07.2004	19:24	29	N13, W56	M6.2/1N	–
14.07.2004	05:02	> 38	N12, W62	M6.2/1N	–
15.07.2004	01:30	> 18	S10, E54	X1.8/2N	УМБ
15.07.2004	18:15	> 19	S11, E45	X1.6/1B	УМБ
16.07.2004	01:43	> 30	S11, E43	X1.3/1B	–
16.07.2004	10:32	26	S10, E36	X1.1/1F	–
16.07.2004	13:49	103	S11, E35	X3.6/3B	–
17.07.2004	07:51	35	S11, E24	X1.0/1F	–
20.07.2004	12:22	41	N11, E34	M8.6/3B	УМБ
22.07.2004	00:14	> 29	N03, E17	M9.1/2B	БМБ
25.07.2004	05:40	43	N10, W31	M7.1/2B	–
25.07.2004	13:37	> 27	N04, W30	M2.2/1N	–

Примечание: Рентгеновский класс вспышек: М – интенсивность вспышки в пике от 10^{-5} до 10^{-4} Вт/м², Х – интенсивность вспышки в пике больше 10^{-4} Вт/м² (цифра после буквы – значение интенсивности в Вт/м²); оптический балл вспышек: F – слабая, N – нормальная, В – яркая (цифра перед буквой характеризует площадь вспышки); φ – гелиографическая широта, λ – угловое расстояние от центрального меридиана; УМБ – умеренная магнитная буря, БМБ – большая магнитная буря.

Поток радиоизлучения, о. е.

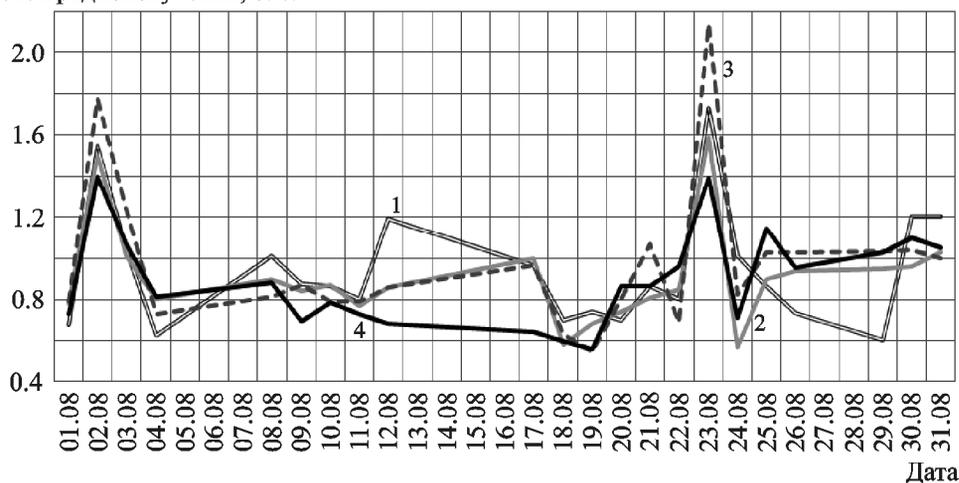


Рис. 5. Вариации потока излучения радиоисточника 3C461 (поляризация – А, частота – 25 МГц) в августе 2005 г. на различных часовых углах: 1 – -60° ; 2 – 0° ; 3 – 60° ; 4 – 120°

вблизи восточного лимба в группе пятен северного полушария произошла большая вспышка класса М6.4/SF. Большая магнитная буря 24–25 августа стала следствием вспышек 22 августа и привела к спаду уровня потока радиоисточника.

4. Результаты расчетов корреляционных моделей

Расчеты парной корреляционной зависимости уровня потока излучения радиоисточника от индексов солнечной и геомагнитной активности де-

монстрируют недостаточно высокие коэффициенты корреляции на всех исследуемых периодах наблюдений (см. табл. 3–5).

Наибольшее значение коэффициента парной корреляции потока излучения радиоисточников отмечается с индексом $F10.7$ (ноябрь 2003 г.), потоком электронов с энергиями больше 0.6 МэВ (июль 2004 г.), потоком протонов с энергиями больше 10 МэВ (август 2005 г.). Графическая иллюстрация этих зависимостей отображена на рис. 6–8 соответственно.

На изменение потока излучения радиоисточников влияет не отдельно взятый фактор, а ком-

Таблица 3. Парные коэффициенты корреляции корреляционной зависимости потока излучения радиоисточника ЗС461 от индексов солнечной активности (ноябрь 2003 г.)

Индексы солнечной активности	Часовой угол			
	-60^m	0^m	60^m	120^m
$F10.7$	0.40	0.05	0.16	0.13
W	0.45	0.15	0.20	0.20
Sp	0.50	0.14	0.17	0.37
K	-0.21	-0.25	-0.27	-0.24
$P > 1$ МэВ	-0.15	-0.16	-0.18	-0.11
$P > 10$ МэВ	-0.39	-0.59	-0.54	-0.59
$P > 100$ МэВ	-0.36	-0.46	-0.43	-0.52
$E > 0.6$ МэВ	0.02	0.02	-0.17	0.21
$E > 2$ МэВ	0.04	0.04	0.00	0.04

Примечание: жирным шрифтом отмечены наиболее сильные зависимости

Таблица 4. Парные коэффициенты корреляции корреляционной зависимости потока излучения радиоисточника ЗС461 от индексов солнечной активности (июль 2004 г.)

Индексы солнечной активности	Часовой угол					
	-160^m	-120^m	-80^m	-40^m	0^m	40^m
$F10.7$	0.02	-0.12	0.23	0.03	-0.28	0.11
W	0.08	-0.12	0.01	-0.11	-0.32	0.06
Sp	0.03	-0.21	0.17	0.03	-0.29	0.11
K	0.29	0.18	0.30	0.12	-0.18	-0.09
$P > 1$ МэВ	-0.05	0.06	0.03	0.00	-0.12	-0.17
$P > 10$ МэВ	-0.09	0.02	0.07	-0.01	-0.12	-0.20
$P > 100$ МэВ	-0.30	-0.01	-0.19	-0.12	0.10	-0.32
$E > 0.6$ МэВ	0.26	0.22	0.26	0.55	0.31	0.42
$E > 2$ МэВ	0.17	0.24	0.14	-0.11	0.16	0.10

Примечание: жирным шрифтом отмечены наиболее сильные зависимости

Таблица 5. Парные коэффициенты корреляции корреляционной зависимости потока излучения радиоисточника ЗС461 от индексов солнечной активности (август 2005 г.)

Индексы солнечной активности	Часовой угол			
	-60^m	0^m	60^m	120^m
$F10.7$	0.19	0.35	0.45	0.50
W	0.01	0.16	0.24	0.42
Sp	0.17	0.23	0.36	0.36
K	0.06	-0.18	-0.05	-0.10
$P > 1$ МэВ	0.37	0.10	0.33	0.16
$P > 10$ МэВ	0.60	0.52	0.67	0.38
$P > 100$ МэВ	0.48	0.47	0.59	0.38
$E > 0.6$ МэВ	-0.20	-0.18	-0.21	-0.18
$E > 2$ МэВ	-0.08	-0.08	-0.13	-0.09

Примечание: жирным шрифтом отмечены наиболее сильные зависимости.

плекс явлений и процессов, формирующий состояние космической погоды. Поэтому в дальнейших расчетах применялся метод множественного корреляционного анализа.

С учетом взаимной корреляции независимых переменных было построено более 60 моделей для каждого часового угла в каждом исследуемом периоде наблюдений. На основе расчетов этих моделей выявлялись максимальные вклады в значение множественного коэффициента корреляции. Были составлены сводные таблицы результатов (см. табл. 6–8). Графической иллюст-

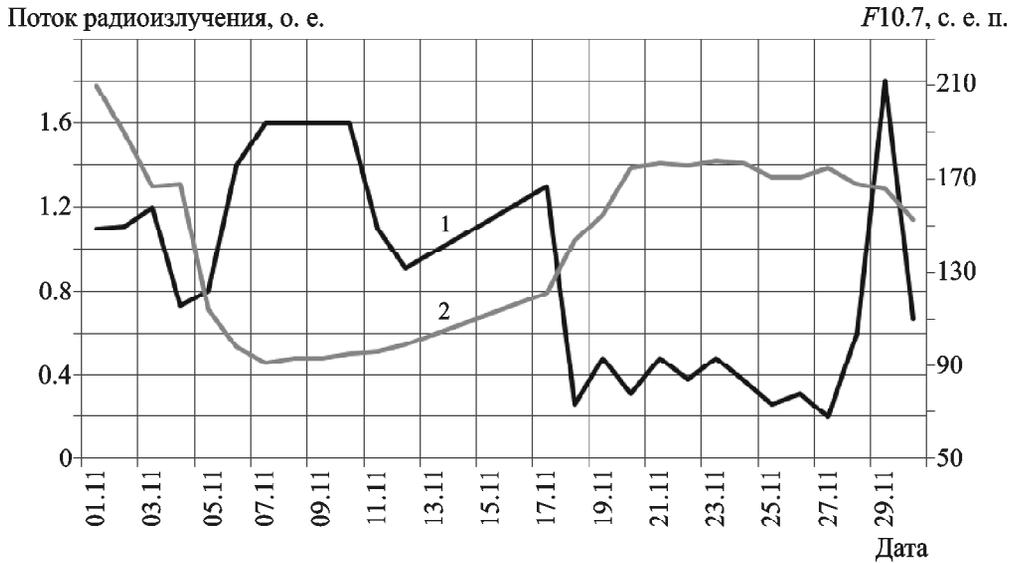


Рис. 6. Изменение уровня излучения потока радиоисточника 3C461 (поляризация – А, частота – 25 МГц) (кривая 1) относительно индекса F10.7 (кривая 2) в ноябре 2003 г.

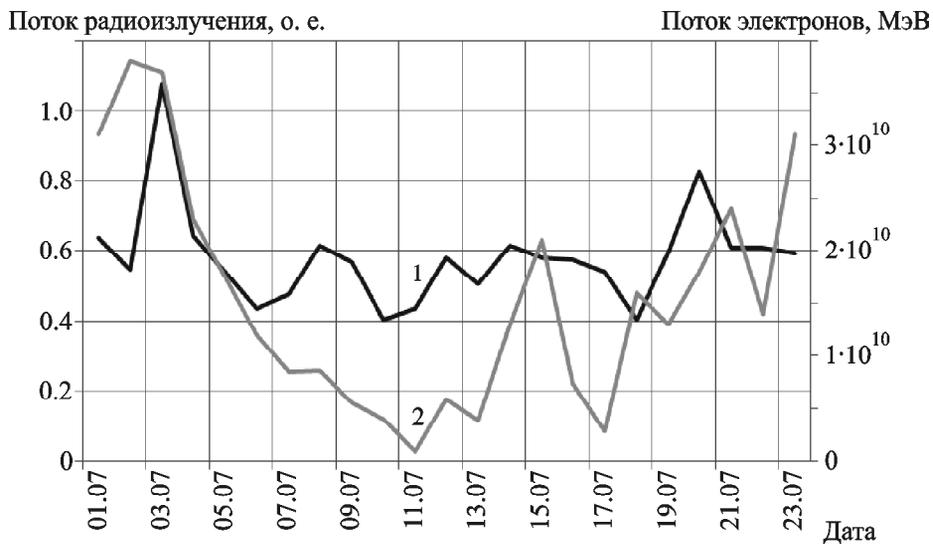


Рис. 7. Изменение уровня потока радиоисточника 3C274 (поляризация – А, частота – 25 МГц) (кривая 1) относительно потоков электронов с энергиями больше 0.6 МэВ (кривая 2) в июле 2004 г.

рацией качества работы построенной модели является график зависимости наблюдаемых значений выходной переменной от предсказанных значений (см. рис. 9–11).

Множественные корреляционные модели, построенные для всех часовых углов наблюдения радиоисточников, показывают, что значения коэффициента множественной корреляции находят-

ся в пределах $0.87 \div 0.99$. Все отраженные в табл. 6–8 индексы солнечной активности демонстрируют достаточно высокие коэффициенты частной корреляции. Наибольшие значения частных коэффициентов корреляции получены для индексов $F10.7$, W , S_p . Среди компонент магнитного поля наибольшее влияние оказывает вертикальная составляющая магнитного

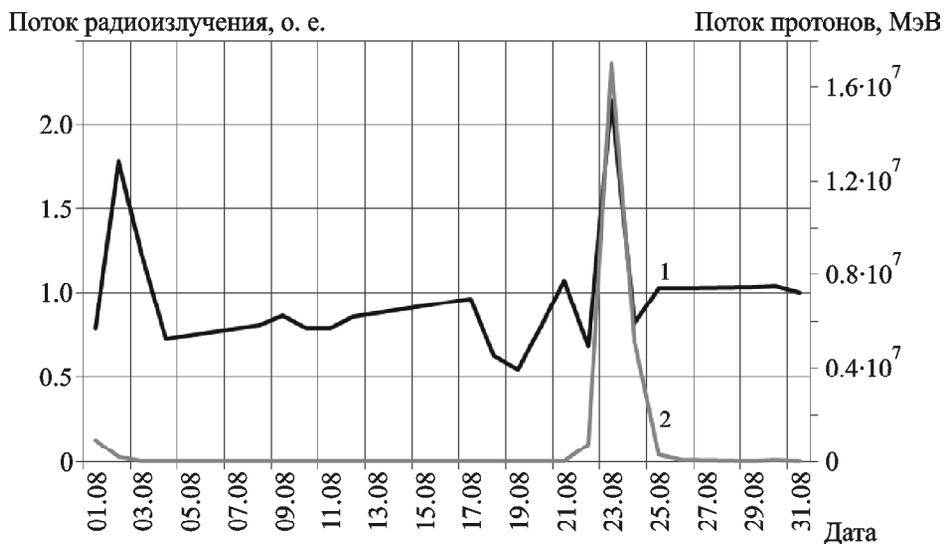


Рис. 8. Изменение уровня потока радиоисточника 3C274 (поляризация – А, частота – 25 МГц) (кривая 1) относительно потоков протонов с энергиями больше 10 МэВ (кривая 2) в августе 2005 г.

Таблица 6. Сводная таблица результатов расчета множественной регрессии для радиоисточника 3C461 (поляризация – А, частота – 25 МГц, ноябрь 2003 г.)

Индексы солнечной активности	Часовой угол / R_{\max}			
	$-60^m / 0.97$	$0^m / 0.87$	$60^m / 0.89$	$120^m / 0.94$
$F10.7$	-0.54	-0.58	-0.5	-0.67
W	0.47	-0.47	-0.39	-0.52
Sp	0.54	-0.29	0.44	-0.45
K	0.4	0.37	0.3	0.37
H	0.58	0.44	0.5	0.51
Z	-0.72	-0.64	-0.69	-0.7
D	-0.51	-0.41	-0.44	-0.48
$P > 1$ МэВ	0.5	-0.25	0.22	-0.52
$P > 10$ МэВ	0.56	0.26	0.31	0.33
$P > 100$ МэВ	0.75	0.4	0.42	0.71
$E > 0.6$ МэВ	-0.69	-0.5	-0.61	-0.6
$E > 2$ МэВ	-0.53	-0.33	-0.44	-0.38
v , км/с	0.55	-0.47	0.34	0.46
ρ , см ⁻³	-0.58	0.32	-0.44	-0.44

Примечание: R_{\max} – максимальное значение коэффициента множественной корреляции.

поля Z . Корпускулярная составляющая, представленная потоками протонов и электронов как во время вспышек, так и в регулярном солнечном ветре, также оказывает заметное воздействие на поток радиоисточника. Однако лидирующая роль принадлежит потокам протонов с энергией >100 МэВ, соответствующим особому классу

“протонных вспышек” и дающим наиболее сильный эффект воздействия на магнитосферу и ионосферу [5].

Соотношение степени влияния индексов, характеризующих космическую погоду, зависит от сезонно-суточных условий наблюдения радиоисточников.

Таблица 7. Сводная таблица результатов расчета множественной регрессии для радиоисточника 3С461 (поляризация – А, частота – 25 МГц, июль 2004 г.)

Индексы солнечной активности	Часовой угол / R_{\max}					
	$-160^m / 0.97$	$-120^m / 0.97$	$-80^m / 0.94$	$-40^m / 0.94$	$0^m / 0.88$	$40^m / 0.96$
$P > 1$ МэВ	-0.71	-0.76	-0.58	-0.58	-0.63	-0.69
$P > 10$ МэВ	-0.72	-0.32	0.27	-0.55	-0.29	-0.53
$P > 100$ МэВ	-0.64	0.56	0.45	-0.48	0.63	-0.7
$E > 0.6$ МэВ	-0.71	-0.37	0.39	-0.78	0.41	-0.73
$E > 2$ МэВ	0.87	0.82	0.64	0.85	0.68	0.82
$F10.7$	0.78	0.8	0.8	0.71	0.71	0.66
W	-0.51	0.49	-0.55	-0.46	-0.22	0.58
Sp	-0.52	0.34	0.63	0.44	0.31	0.38
K	0.4	0.31	0.43	-0.32	-0.59	-0.17
H	-0.73	0.32	0.52	0.45	-0.55	0.49
Z	-0.71	-0.44	-0.59	-0.53	-0.59	0.35
D	0.67	0.33	0.52	-0.49	-0.28	-0.47
v , км/с	0.42	-0.39	0.26	0.34	0.45	-0.48
ρ , см ⁻³	0.52	0.44	0.5	-0.5	0.54	-0.49

Примечание: R_{\max} – максимальное значение коэффициента множественной корреляции.

Таблица 8. Сводная таблица результатов расчета множественной регрессии для радиоисточника 3С461 (поляризация – А, частота – 25 МГц, август 2005 г.)

Индексы солнечной активности	Часовой угол / R_{\max}			
	$-60^m / 0.93$	$0^m / 0.97$	$60^m / 0.99$	$120^m / 0.97$
$F10.7$	-0.3	-0.36	0.61	0.64
W	0.17	0.35	0.47	0.7
Sp	0.31	0.38	0.93	0.62
$P > 1$ МэВ	-0.54	-0.8	-0.94	-0.75
$P > 10$ МэВ	0.81	0.86	0.99	0.81
$P > 100$ МэВ	-0.82	-0.82	-0.99	-0.79
$E > 0.6$ МэВ	-0.48	-0.46	-0.95	-0.42
$E > 2$ МэВ	-0.27	-0.25	0.9	0.23
K	0.7	-0.7	-0.97	-0.73
H	0.5	-0.45	0.91	-0.36
Z	0.66	0.3	0.83	0.42
D	-0.28	0.33	0.88	0.63
v , км/с	0.78	0.86	0.99	0.81
ρ , см ⁻³	0.73	0.83	0.98	0.77

Примечание: R_{\max} – максимальное значение коэффициента множественной корреляции.

Характер влияния этих факторов определяет их воздействие на вариации потока радиоизлучения источников. Вследствие увеличения ультрафиолетового излучения Солнца происходит рост электронной концентрации, что приводит к увели-

чению поглощения и как следствие к уменьшению потока излучения радиоисточников. Потоки протонов с энергиями соответственно больше 1, 10 и 100 МэВ и электронов с энергиями больше 0.6 МэВ и больше 2 МэВ также приводят к раз-

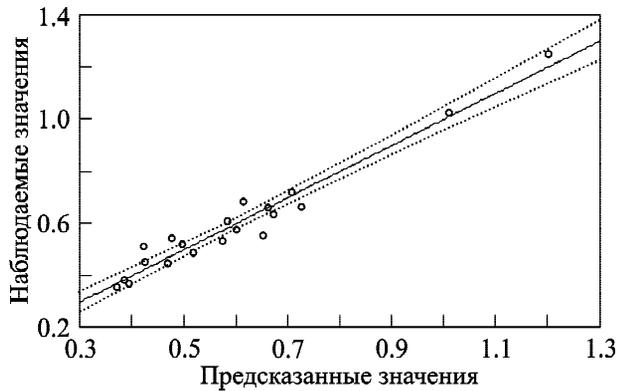


Рис. 9. График предсказанных и наблюдаемых значений потока излучения радиоисточника 3С274 в июле 2004 г., построенный для часового угла $120^{\text{м}}$, (пунктирные линии – 95 % доверительный интервал)

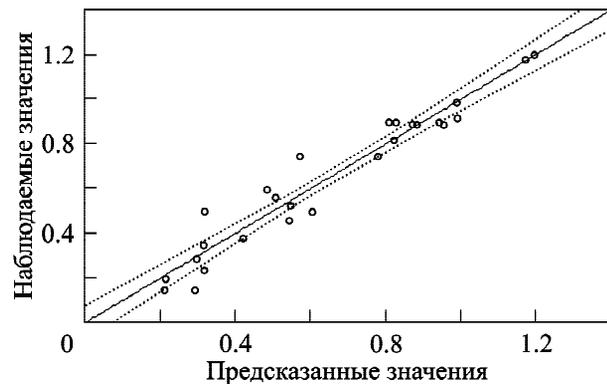


Рис. 10. График предсказанных и наблюдаемых значений потока излучения радиоисточника 3С461 в ноябре 2003 г., построенный для часового угла $-60^{\text{м}}$, (пунктирные линии – 95 % доверительный интервал)

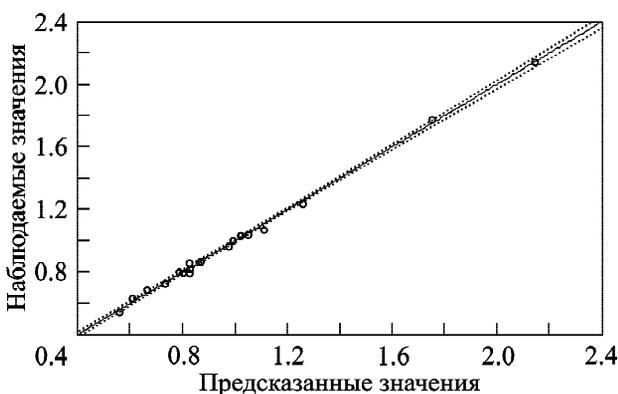


Рис. 11. График предсказанных и наблюдаемых значений потока излучения радиоисточника 3С461 в августе 2005 г., построенный для часового угла $60^{\text{м}}$, (пунктирные линии – 95 % доверительный интервал)

личным и довольно значительным изменениям потока излучения радиоисточников, т. к. они вносят свой особый вклад в характер изменения электронной концентрации в ионосфере на различных фазах магнитных бурь.

Результаты расчета корреляционных моделей для различных часовых углов приема излучения радиоисточников свидетельствуют о наличии угловой структуры распределения электронов и протонов различных энергий в потоке частиц, создаваемых мощными солнечными вспышками.

Для ряда индексов и значений часовых углов коэффициенты частной корреляции меняют знак зависимости. Это может быть объяснено изменением угла между направлением антенны на источник, направлением на Солнце (индекс S_p) и направлением прихода солнечного ветра.

Особенностью периода измерений в августе 2005 г. является то, что наблюдения радиоисточника проходили в ночные часы. В связи с этим преобладающими факторами влияния на изменение потока излучения радиоисточника стали потоки электронов и протонов, а не волновые индексы, в большей степени влияющие на состояние дневной ионосферы.

Характер зависимости потока излучения радиоисточника от потоков электронов и протонов станет предметом дальнейших исследований.

5. Выводы

1. В работе рассмотрены и проанализированы экстремальные периоды солнечной активности. Экстремальные проявления космической погоды представляют собой целый комплекс явлений, сопровождающих вспышки на Солнце или корпускулярные потоки от корональных дыр, выбросы намагниченной корональной плазмы, потоки электронов и протонов в околоземном пространстве и последующие магнитные бури. Поэтому изменение уровня потока радиоисточников определяет не отдельно взятый фактор, а комплекс явлений и процессов, формирующих состояние космической погоды, учет которых требует применения метода множественного корреляционного анализа.

2. В результате расчетов более 60 моделей (для каждого часового угла) множественной корреляционной зависимости между потоками излучения радиоисточника и факторами, формирующими космическую погоду, получены значения

множественного коэффициента корреляции, лежащие в интервале $0.86 \div 0.99$.

3. Наиболее значимые факторы:

– ведущие факторы – индексы солнечной активности и их частные коэффициенты корреляции (в скобках) $F10.7$ (0.80), W (0.70), S_p (0.93);

– индексы, характеризующие состояние возмущенности магнитного поля, полученные по данным на станции “Одесса”, K , H , Z , D ; ведущие факторы и их частные коэффициенты корреляции (в скобках) – H (0.91), Z (0.83);

– потоки частиц (электроны и протоны с различными энергиями), скорость и концентрация частиц солнечного ветра; ведущие факторы и их частные коэффициенты корреляции (в скобках) – $E > 2$ МэВ (0.90), $P > 100$ МэВ (–0.99).

4. Благодаря большому объему данных наблюдений на радиотелескопе “УРАН-4”, полученному в результате мониторинга космических радиоисточников начиная с 1987 г. и по настоящее время, возможно детальное изучение проявлений эффектов космической погоды в ионосфере, что будет осуществлено в последующих работах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябов М. И., Панишко С. К., Гугля Л. И. Эффекты воздействия состояния космической погоды на верхнюю атмосферу Земли по данным мониторинга потоков мощных радиоисточников на РТ “УРАН-4” РИ НАНУ. *Odessa Astronomical Publications*. 2011. Vol. 24. P. 159–161.
2. Собитняк Л. И., Рябов М. И., Сухарев А. Л., Панишко С. К. Структура переменности индексов космической погоды в применении к данным мониторинга потоков излучения радиоисточников на радиотелескопе “УРАН-4”. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2017. Т. 22, № 4. С. 294–303. DOI: 10.15407/rpra22.04.294
3. В. А. Боровиков. *STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере*. Санкт-Петербург: Питер, 2001. 656 с.
4. *Солнечная и солнечно-земная физика: Иллюстрированный словарь терминов*. Под ред. А. Бруцека и Ш. Дюрана. Москва: МИР, 1980. 254 с.
5. Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М. *Солнце и ионосфера. Коротковолновое излучение Солнца и его воздействие на ионосферу*. Москва: Наука, 1969. 456 с.
6. Russell C. T. and McPherron R. L. Semiannual Variation of Geomagnetic Activity. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 1973. Vol. 78, Is. 1. P. 92–108. DOI: 10.1029/JA078i001p00092
7. *Плазменная гелиогеофизика*. Под ред. Л. М. Зеленого и И. С. Веселовского. Москва: Физматлит, 2008. т. 1-2. 560 с.
8. Мирошниченко Л. И. *Физика Солнца и солнечно-земных связей*. Москва: Университетская книга, 2011. 174 с.
9. Обридко В. Н., Наговицын Ю. А. *Солнечная активность, цикличность и методы прогноза*. Санкт-Петербург: ВВМ, 2017. 467 с.

REFERENCES

1. RYABOV, M. I., PANISHKO, S. K. and GUGLYA, L. I., 2011. Space weather impacts on the Earth's upper atmosphere according to the monitoring of powerful radio sources fluxes at the URAN-4 radio telescope (Institute of Radio Astronomy, NAS of Ukraine). *Odessa Astronomical Publications*. vol. 24, pp. 159–161. (in Russian).
2. SOBITNIAK, L. I., RYABOV, M. I., SUKHAREV, A. L. and PANISHKO, S. K., 2017. Structure of variability indexes of cosmic weather as applied to data monitoring of fluxes of radio sources at the “URAN-4” radio telescope. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 22, no. 4, pp. 294–303 (in Russian). DOI: 10.15407/rpra22.04.294
3. BOROVIKOV, V. A., 2001. *STATISTICA: The art of data analysis on a computer*. St. Petersburg: Piter Publ. (in Russian).
4. BRUZEK, A. and DURRANT, C. J., eds., 1977. *Illustrated glossary for solar and solar-terrestrial physics*. Dordrecht, Boston: D. Reidel Pub. Co.
5. IVANOV-KHOLODNYI, G. S. and NIKOLSKY, G. M., 1969. *The Sun and Ionosphere. Short wave solar radiation and its effect on the ionosphere*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
6. RUSSELL, C. T. and MCPHERSON, R. L., 1973. Semiannual Variation of Geomagnetic Activity. *J. Geophys. Res. Space Phys.* vol. 78, is. 1, pp. 92–108. DOI: 10.1029/JA078i001p00092
7. ZELENYI, L. M. and VESELOVSKIY, I. S., eds., 2008. *Plasma heliogeophysics*. Moscow, Russia: Fizmatlit Publ. vol. 1-2. (in Russian).
8. MIROSHNICHENKO, L. I., 2011. *Physics of the Sun and solar-terrestrial connections*. Moscow, Russia: Universitetskaya Kniga Publ. (in Russian).
9. OBRIDKO, V. N. and NAGOVITSYN, YU. A., 2017. *Solar activity, cyclicity and prediction methods*. St. Petersburg: VVM Publ. (in Russian).

L. I. Sobitniak

Observatory “URAN-4”, Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 37, Pushkinska St., Odesa, 65011, Ukraine

MULTIPLE CORRELATION MODELS OF DEPENDENCE OF RADIANT FLUXES OF COSMIC RADIO SOURCES ON EXTREME CONDITIONS OF SPACE WEATHER AT DECAMETER WAVES

Purpose: Investigation of the effects of the influence of solar and geomagnetic activity on the condition of the Earth's upper atmosphere by the method of “transmission through” it with the radiation of cosmic radio sources.

Design/methodology/approach: Monitoring of the fluxes of powerful galactic and extragalactic radio sources is carried out at the URAN-4 radio telescope of the Odesa Observatory of the Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine since 1987 till now. The monitoring program includes radio galaxies 3C274, 3C405 and supernova remnants 3C144, 3C461. Changes of fluxes of radiation sources at decameter waves are determined by the condition of an ionosphere resulted due to space weather variation.

Findings: The models of multiple correlation dependence of fluxes of radio sources on the factors forming space weather for the periods of extreme conditions of the solar and geomagnetic activity are considered. The explanatory variables are divided into three groups: indices of solar activity, flows of particles, magnetic field components. Over 60 models of the multiple correlation dependence were calculated. Values of a multiple coefficient of correlation within 0.86 to 0.99 were obtained. The greatest contribution to the quantity of a multiple coefficient of correlation give: solar radio emission at the wave of 10.7 cm ($F10.7$), the total area of groups of spots (S_p), flows of electrons (E) and protons (P).

Conclusions: Monitoring of fluxes of space radio sources made at the “URAN-4” radio telescope makes it possible to “transmit through” the Earth ionosphere above the radio telescope and determines the integral effect of the solar and geomagnetic activity influence on it. The great amount of the data observed with using the “URAN-4” radio telescope allows more detailed study of the influence of space weather effects in the ionosphere to be made in our next works.

Key words: upper atmosphere, solar activity, geomagnetic activity, space weather

Л. І. Собітняк

Обсерваторія “УРАН-4”,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
вул. Пушкінська, 37, м. Одеса, 65011, Україна

МНОЖИННІ КОРЕЛЯЦІЙНІ МОДЕЛІ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТОКІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ КОСМІЧНИХ РАДІОДЖЕРЕЛ В ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ВІД ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ПРОЯВІВ КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Предмет і мета роботи: Дослідження ефектів впливу сонячної і геомагнітної активності на стан верхньої атмосфери

Землі методом “просвічування” її випромінюванням космічних радіоджерел.

Методи і методологія: Моніторинг потоків потужних галактичних і позагалактичних радіоджерел виконується на радіотелескопі “УРАН-4” Одеської обсерваторії Радіоастрономічного інституту НАН України з 1987 р. і до тепер. У програму моніторингу входять радіогалактики 3С274, 3С405 і залишки наднових 3С144, 3С461. Зміни потоків випромінювання радіоджерел на декаметрових хвилях визначаються станом іоносфери під впливом космічної погоди.

Результати: Розглянуто моделі множинної кореляційної залежності потоків радіоджерел від факторів, що формують космічну погоду для періодів екстремальних її проявів. Незалежні змінні розділено на три групи: індекси, що характеризують сонячну активність; потоки частинок; компоненти магнітного поля. Розраховано понад 60 варіантів моделей множинної кореляційної залежності. Отримано значення множинного коефіцієнта кореляції в інтервалі $0.86 \div 0.99$. Найбільші внески у величину множинного коефіцієнта кореляції дають: радіовипромінювання Сонця на хвилі 10.7 см ($F10.7$), площа плям (S_p), потік електронів (E) і потік протонів (P).

Висновок: Моніторинг потоків випромінювання космічних радіоджерел, виконуваний на радіотелескопі “УРАН-4”, дозволяє “просвічувати” іоносферу Землі над радіотелескопом та визначає інтегральний ефект впливу на неї сонячної й геомагнітної активності. Великий обсяг даних спостережень на радіотелескопі “УРАН-4” уможливило детальне вивчення прояву ефектів космічної погоди в іоносфері, що буде виконано у наступних працях.

Ключові слова: верхня атмосфера, сонячна активність, геомагнітна активність, космічна погода

Статья поступила в редакцию 26.06.2018