



МОДЕЛЬ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 1. ДАЛЕКОЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЦА

А.А. Нусинов, Т.В. Казачевская, В.В. Катюшина

Развит подход к созданию модели спектра далёкого ультрафиолетового излучения Солнца (ДУФ) в области длин волн, ответственной за диссоциацию молекулярного кислорода (115-242 нм). Модель основана на представлении о линейной зависимости потоков в излучения в интервалах шириной 1 нм от интенсивности в линии Лайман-альфа водорода (её предполагается измерять фотометрами крайнего ультрафиолетового излучения (КУФ) на КА космического сегмента гелиогеофизических служб). Для каждого из этих интервалов получены коэффициенты линейной зависимости. Сравнение результатов модельных расчётов с наблюдениями показали, что погрешность модели не превышает 1-2%, что достаточно для целей расчёта состояния термосферы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Солнце, солнечный спектр, модель далёкого солнечного излучения

ВВЕДЕНИЕ

Солнечное излучение является наиболее важным фактором формирования верхней атмосферы. Из всего спектра излучения наиболее существенным для образования верхней атмосферы ультрафиолетовое излучение Солнца. Воздействие излучения на верхнюю атмосферу приводит к ряду фотохимических процессов, прежде всего, диссоциации молекул кислорода, а избыток энергии диссоциирующего кванта над энергией диссоциации идет на нагрев атмосферы. На высотах более ~120 км концентрации атомного и молекулярного кислорода сравниваются, а на высотах ~180 км концентрация атомного кислорода превосходит концентрацию также и молекул азота, и атомный кислород становится основным компонентом верхней атмосферы. Образование атомного кислорода почти всецело обусловлено диссоциацией молекул кислорода под воздействием ультрафиолетового излучения и процессами переноса. Порог диссоциации соответствует длине волны излучения $\lambda=242$ нм [Окабе, 1981]. При длинах волн короче 104 нм происходит ионизация атмосферных газов, (см., например, [Иванов-Холодный и Михайлов, 1980]). Для этого участка спектра возникновением атомов кислорода можно пренебречь. Помимо диссоциации, поглощение в атмосфере ДУФ приводит к её нагреву (см., например, [Семенов и Шефов, 2005]). Важность учёта вариаций потока ДУФ-излучения с уровнем активности при исследовании верхней атмосферы подчеркнута в [Woods et Lean, 2007]: если при переходе от минимума солнечной активности к максимуму изменение температуры на высоте ~ 10 км составляет ~ 0.1 К, и ~ 1 К на 50 км, то на высотах ~500 км, в термосфере, изменения превышают 400 К. Таким образом, для моделирования основных процессов формирования верхней атмосферы требуется знание потоков в области 104-242 нм. В конечном счете, долговременные изменения верхней атмосферы обусловлены вариациями в этом диапазоне.

Появление в последние два десятилетия мониторинга спектра излучения Солнца позволило детально исследовать характер воздействия вариаций излучения на верхнюю атмосферу (см., например, [Ermolli et al., 2013]) и на изменения атмосферного озона (например, [Merkel, 2011]).

Актуальным вопросом является проблема "оседания атмосферы" т.е. существования систематического снижения плотности верхней атмосферы на фиксированных высотах.

(см., например, [Solomon et al., 2010]. Одним из возможных механизмов такого изменения является уменьшение интенсивности нагрева атмосферы и скорости диссоциации молекулярного кислорода вследствие снижения потока ДУФ. Модель излучения дает возможность проследить многолетние вариации ДУФ по архивным данным о входных параметрах в течение длительного времени, превышающего длительность эпохи спутниковых наблюдений, например, по ионосферным данным [Нусинов, 2004].

Моделирование потоков ДУФ при различных гелиофизических условиях необходимо при решении некоторых практических задач. В частности, к необходимости учёта факторов воздействия, приводящих к деградации различных компонентов космических аппаратов, и определяемых, наряду с потоками ультрафиолетового излучения, например, фотоэлектронами, потоками ионов кислорода O^+ и другими заряженными частицами низкой энергии, характеристики которой обусловлены состоянием верхней атмосферы.

Несмотря на актуальность проблемы создания достаточно точной и легко используемой модели ДУФ – излучения, адекватно описывающей как величины потоков излучения, так и их вариации для различных масштабов времени, до сих пор не существует моделей, надежно воспроизводящих потоки излучения в этом диапазоне при разных уровнях солнечной активности. Существует эталонный спектр для минимума активности в 2008 г. [Woods et al. 2009, Chamberlin et al, 2009] предложены методы расчёта спектра для длин волн от 200 нм [Lean, 1997, Lean, 2000, Lean et al., 2005]. Модели NRLSSI [Lean, 2000] и SATIRE [Ball, 2011], в принципе, удовлетворяют изложенным выше требованиям, однако их использование затруднительно, поскольку для этого необходимо одновременное наблюдение солнечных пятен, площадей факельных площадок и Mg-индекса. Кроме того, в [Yeo et al., 2015] отмечено, что модель NRLSSI дает существенно заниженные результаты по сравнению с надежными измерениями на КА SORCE.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При разработке модели необходимо, чтобы используемые данные удовлетворяли ряду требований. Во-первых, их вариации должны соответствовать наиболее широкому диапазону уровней солнечной активности, от минимального уровня до максимального. Данные должны быть получены одним и тем же прибором в течение цикла солнечной активности или за более длинный период. Однако при длительных измерениях чувствительность приборов может заметно изменяться вследствие деградации датчиков (см., например, [Woods, 2008, Woods et al., 2017, Schmidtke, 2015]).

В настоящее время накоплен большой объем данных спутниковых наблюдений потоков солнечного излучения в этой области спектра. При этом во многих временных рядах сложно отличить долговременные изменения, обусловленные солнечной активностью, от эффектов деградации измерительных средств. Следует отметить, что изменение чувствительности со временем может быть немонотонным, как это наблюдалось, например, в измерениях аппаратурой ВУСС на КА "КОРОНАС-Ф" [Нусинов и др., 2009]. Исключение эффектов деградации возможно путем использования калибровки в полёте путем сравнения текущих данных с калибровочными измерениями на ракетах или с эталонными (газоразрядные лампы или звёзды) источниками. В последнее время удаётся исключить эффекты деградации аппаратуры с помощью усовершенствованных методов анализа данных [Woods et al., 2018].

В настоящее время наиболее надежными, охватывающих во времени весь солнечный цикл, являются данные, полученные в рамках проектов SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment, 2003 г. по наст. время) и TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Dynamics, and Energetics, 2002 г. по наст. время). Спектральный диапазон SORCE (115-308 нм) полностью включает в себя все длины волн, соответствующие разрабатываемой модели, в то время, как диапазон TIMED (27-190 нм) содержит лишь часть заданного диапазона. Исходя из этого для разработки модели приняты данные измерений SORCE, а данные TIMED использовались для проверки модели. Следует отметить, что такое использование данных оправдано, поскольку в обоих проектах использовались одни и те же методы калибровки.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ. МОДЕЛЬ ВАРИАЦИЙ ДУФ

Для анализа использовались среднесуточные данные измерений ДУФ аппаратурой *SORCE/SOLSTICE* [Spam et al., 2005] в области 115-242 нм из базы данных *LISIRD* [Dewolfe et al., 2010]; рассматривались измерения, соответствующие более чем 5500 датам. Интернет-адрес базы данных: <http://lasp.colorado.edu/lisird/>. Исследовалась зависимость потоков фотонов в различных спектральных интервалах от потока в линии L_{α} (с длиной волны $\lambda=121.6$ нм) при различных уровнях солнечной активности. Анализ показал, что при всех уровнях активности зависимость для любых длин волн близка к линейной. Примеры результатов анализа представлены на рис. 1 для двух интервалов длин волн: 130-131 нм и 200-201 нм. Из рисунка видно, что отклонения данных измерений от аппроксимирующих прямых не велики и не превышают нескольких процентов. Анализ показал, что аппроксимация с помощью полиномов более высокого порядка не приводит к сколько-нибудь заметному снижению погрешности аппроксимации.

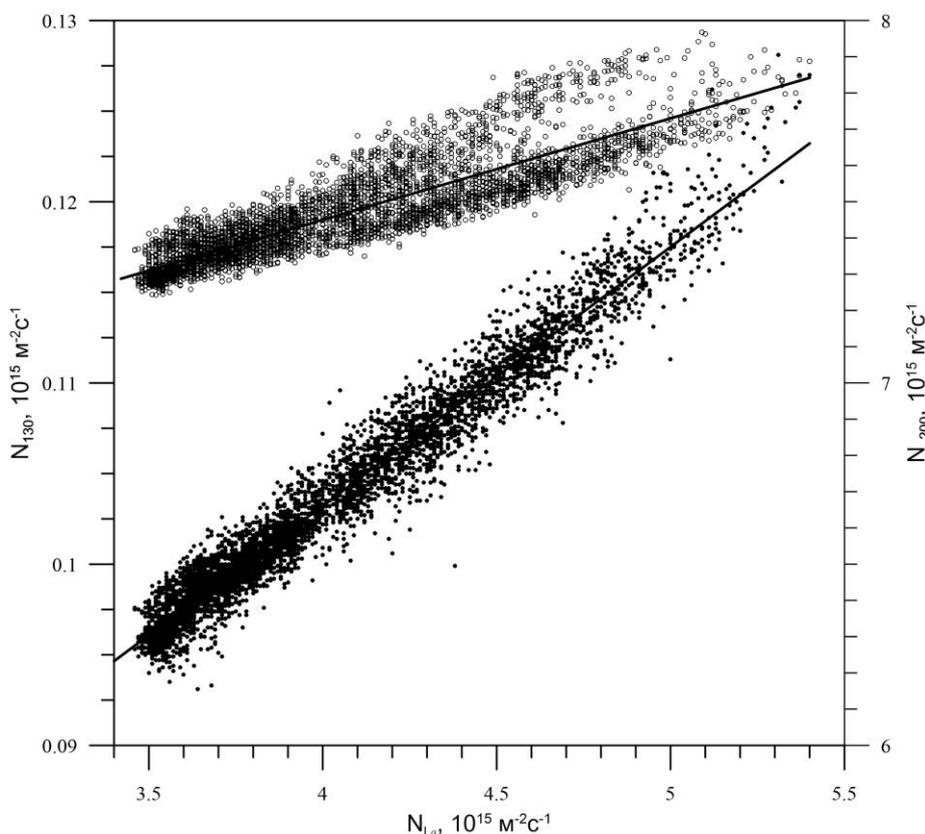


Рис. 1. Зависимость потоков квантов в интервале 130-131 нм (точки) и 200-201 нм (кружки) от потока в линии Лайман-альфа.

Прямые линии на рисунке соответствуют уравнению линейной регрессии

$$N_{\lambda} = 10^{15} (B_0 + B_1 \cdot N_{L\alpha}), \tag{1}$$

где N_{λ} в единицах $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$, а $N_{L\alpha}$ – поток в линии Лайман-альфа в единицах $10^{15} \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Из рисунка видно, что отклонения от линий регрессии невелики и не превышают нескольких процентов при любых уровнях солнечной активности. Средняя величина отклонения ε данных измерений от результатов расчёта по уравнению может быть оценена исходя из соотношения $\varepsilon = 1/n \sum (|N_{\lambda n} - N_{\lambda p}| / N_{\lambda n})$, где n – число измерений, индексы "н" и "р" относятся к наблюдаемым и расчётным величинам. Анализ показал, что при использовании линейной регрессии погрешность ε для всех длин волн не превышает 2.1%, а среднее по длинам волн значение ε составляет $\sim 0.8\%$.

Соотношение (1) вместе с входящими в него коэффициентами B_0 и B_1 составляет модель излучения. Коэффициенты регрессии определялись с помощью стандартных процедур статистического анализа и приведены в таблице 1 для всех исследованных длин волн λ . В таблице 1 указаны коэффициенты линейной регрессии B_0 и B_1 , sb_0 и sb_1 – статистические оценки погрешностей определения коэффициентов регрессии, F_1 – критерий значимости уравнения регрессии Фишера, а также R_{xy} – коэффициент корреляции и ε % – средняя величина погрешности результатов расчета.

Таблица 1. Коэффициенты регрессии модели.

λ nm	B_0	sb_0	B_1	sb_1	F_1	R_{xy}	ε , %
115-116	0.004255	7.15E-05	0.001804	1.76E-05	3.02	0.82	2.11
116-117	0.009489	7.97E-05	0.001171	1.96E-05	1.68	0.64	1.60
117-118	0.01697	0.000303	0.008033	7.45E-05	3.23	0.83	1.48
118-119	0.0101	0.0001	0.002357	2.46E-05	2.76	0.8	1.20
119-120	0.01105	0.000121	0.005337	2.98E-05	7.17	0.93	0.93
120-121	-0.01811	0.000348	0.02848	8.57E-05	22.23	0.98	1.08
121-122	0.003353	0.01549	1.033	0.003812	15.11	0.97	0.16
122-123	0.01356	0.00013	0.006924	3.21E-05	9.93	0.95	0.66
123-124	0.008174	0.000107	0.004624	2.62E-05	6.96	0.93	1.06
124-125	0.00567	0.000085	0.003473	2.09E-05	6.29	0.92	1.05
125-126	0.007356	7.36E-05	0.002591	1.81E-05	4.92	0.89	0.87
126-127	0.002345	0.000129	0.00551	3.18E-05	6.76	0.92	1.11
127-128	0.006251	6.53E-05	0.001672	1.61E-05	3.08	0.82	1.06
128-129	0.00537	5.22E-05	0.001231	1.29E-05	2.76	0.8	1.16
129-130	0.00298	6.53E-05	0.002255	1.61E-05	4.78	0.89	1.44
130-131	0.04721	0.000442	0.01398	0.000109	4.17	0.87	1.01
131-132	0.01054	8.34E-05	0.00156	2.05E-05	2.11	0.73	1.03
132-133	0.007355	7.92E-05	0.001534	1.95E-05	2.19	0.74	1.21
133-134	0.00665	0.000912	0.03015	0.000225	4.46	0.88	1.24
134-135	0.007007	6.58E-05	0.001445	1.62E-05	2.53	0.78	1.18
135-136	0.01813	0.000135	0.002713	3.33E-05	2.28	0.75	1.02
136-137	0.01027	8.01E-05	0.002021	1.97E-05	3.02	0.82	1.13
137-138	0.01175	6.63E-05	0.002049	1.63E-05	4.02	0.87	1.07
138-139	0.01237	6.59E-05	0.001856	1.62E-05	3.51	0.85	1.10
139-140	0.001645	0.000213	0.01301	5.24E-05	12.84	0.96	1.39
140-141	0.01242	0.00014	0.008466	3.46E-05	12.53	0.96	1.17
141-142	0.01757	0.00011	0.002667	0.000027	2.87	0.81	1.12
142-143	0.02024	0.000102	0.002615	0.000025	3.1	0.82	1.10
143-144	0.0227	9.41E-05	0.003154	2.32E-05	4.56	0.88	1.01
144-145	0.02234	9.24E-05	0.003096	2.28E-05	4.55	0.88	1.00
145-146	0.02411	9.96E-05	0.003316	2.45E-05	4.51	0.88	1.01
146-147	0.02969	0.000118	0.004195	2.91E-05	5	0.89	0.89
147-148	0.04167	0.000143	0.004099	3.52E-05	3.6	0.85	0.84
148-149	0.04137	0.000179	0.004621	0.000044	3.11	0.82	0.81
149-150	0.03641	0.000162	0.004487	3.99E-05	3.43	0.84	0.81
150-151	0.04135	0.000182	0.004978	4.48E-05	3.37	0.84	0.82
151-152	0.04423	0.000147	0.005683	3.61E-05	5.76	0.91	0.78

Продолжение таблицы 1

152-153	0.04858	0.000185	0.008902	4.55E-05	8.36	0.94	0.82
153-154	0.05544	0.00028	0.009558	0.000069	4.68	0.89	0.88
154-155	0.07015	0.000725	0.02243	0.000179	4.03	0.87	1.36
155-156	0.07628	0.000539	0.01665	0.000133	4.03	0.87	1.10
156-157	0.09533	0.000502	0.01224	0.000124	2.88	0.81	0.72
157-158	0.08871	0.000437	0.009998	0.000108	2.66	0.79	0.53
158-159	0.09262	0.000432	0.009032	0.000106	2.38	0.76	0.47
159-160	0.09962	0.000431	0.007214	0.000106	1.89	0.69	0.55
160-161	0.1091	0.000485	0.008942	0.00012	2.08	0.72	0.51
161-162	0.1301	0.000575	0.01041	0.000141	2.04	0.71	0.50
162-163	0.1489	0.000768	0.01266	0.000189	1.86	0.68	0.50
163-164	0.1509	0.00058	0.016	0.000143	3.41	0.84	0.46
164-165	0.1584	0.000682	0.02288	0.000168	4.56	0.88	0.49
165-166	0.2813	0.001074	0.02964	0.000264	3.41	0.84	0.42
166-167	0.2161	0.000726	0.01449	0.000179	2.26	0.75	0.36
167-168	0.2168	0.000877	0.02748	0.000216	4.11	0.87	0.40
168-169	0.2862	0.000953	0.01855	0.000235	2.2	0.74	0.35
169-170	0.3833	0.001568	0.0237	0.000386	1.72	0.65	0.42
170-171	0.4352	0.001492	0.0296	0.000367	2.25	0.75	0.49
171-172	0.4313	0.001543	0.03182	0.00038	2.35	0.76	0.63
172-173	0.4825	0.001733	0.03339	0.000427	2.18	0.74	0.73
173-174	0.5088	0.001819	0.02907	0.000448	1.81	0.67	0.89
174-175	0.6276	0.002324	0.03549	0.000572	1.74	0.65	1.04
175-176	0.7735	0.003001	0.0432	0.000739	1.66	0.63	1.22
176-177	0.8578	0.003425	0.04277	0.000843	1.49	0.58	1.40
177-178	1.02	0.004405	0.05821	0.001085	1.55	0.6	1.58
178-179	1.155	0.005083	0.06216	0.001251	1.47	0.57	1.68
179-180	1.144	0.004476	0.0648	0.001102	1.66	0.63	1.75
180-181	1.401	0.009326	0.1066	0.002295	1.42	0.54	0.92
181-182	1.573	0.01109	0.1521	0.00273	1.6	0.61	0.82
182-183	1.727	0.01052	0.09405	0.002589	1.25	0.45	0.70
183-184	1.856	0.01125	0.1007	0.002768	1.26	0.45	0.63
184-185	1.646	0.009789	0.08043	0.002409	1.21	0.42	0.64
185-186	1.89	0.0112	0.09092	0.002756	1.21	0.42	0.63
186-187	2.175	0.01305	0.1116	0.003213	1.23	0.43	0.65
187-188	2.479	0.01577	0.1192	0.003882	1.18	0.39	0.70
188-189	2.676	0.01799	0.1255	0.004428	1.15	0.37	0.71
189-190	2.915	0.01991	0.1496	0.0049	1.18	0.39	0.69
190-191	3.175	0.02108	0.1391	0.005187	1.14	0.35	0.69
191-192	3.396	0.02265	0.154	0.005573	1.15	0.36	0.66
192-193	3.666	0.02449	0.1667	0.006026	1.15	0.36	0.68
193-194	2.913	0.01902	0.1163	0.004681	1.12	0.33	0.66
194-195	4.689	0.03126	0.2134	0.007693	1.15	0.36	0.65
195-196	4.584	0.02885	0.2048	0.007101	1.16	0.37	0.64
196-197	5.22	0.03255	0.2201	0.008011	1.15	0.36	0.66

Продолжение таблицы 1

197-198	5.308	0.03307	0.221	0.008139	1.14	0.35	0.68
198-199	5.415	0.03347	0.2117	0.008239	1.13	0.34	0.73
199-200	5.9	0.02944	0.2353	0.007245	1.2	0.41	0.69
200-201	6.448	0.03227	0.249	0.007942	1.19	0.4	0.73
201-202	7.161	0.03629	0.2759	0.008931	1.18	0.39	0.81
202-203	7.16	0.0364	0.2573	0.008958	1.16	0.37	0.91
203-204	8.286	0.04254	0.3016	0.01047	1.16	0.37	0.97
204-205	9.194	0.04741	0.343	0.01167	1.17	0.38	0.98
205-206	9.529	0.04912	0.3498	0.01209	1.16	0.37	1.00
206-207	9.929	0.05119	0.3641	0.0126	1.16	0.37	1.00
207-208	11.49	0.05872	0.438	0.01445	1.18	0.39	0.89
208-209	13.61	0.06649	0.4286	0.01637	1.13	0.34	0.73
209-210	20.51	0.09535	0.4344	0.02347	1.07	0.25	0.66
210-211	27.21	0.1236	0.4651	0.03042	1.04	0.21	0.58
211-212	33.28	0.1487	0.5171	0.0366	1.04	0.19	0.48
212-213	31.76	0.1435	0.5343	0.03533	1.04	0.21	0.53
213-214	28.9	0.1295	0.4755	0.03186	1.04	0.2	0.47
214-215	41.62	0.1845	0.6306	0.0454	1.04	0.19	0.41
215-216	33.98	0.1528	0.6064	0.0376	1.05	0.22	0.45
216-217	32.97	0.1474	0.5731	0.03627	1.05	0.21	0.42
217-218	32.2	0.144	0.5724	0.03544	1.05	0.22	0.45
218-219	46.09	0.2052	0.7713	0.05049	1.04	0.21	0.40
219-220	48.56	0.2164	0.8446	0.05327	1.05	0.22	0.40
220-221	48.39	0.215	0.8	0.05292	1.04	0.21	0.41
221-222	34.18	0.1533	0.6375	0.03774	1.05	0.23	0.45
222-223	51.04	0.2254	0.7784	0.05548	1.04	0.19	0.41
223-224	65.4	0.2879	0.9615	0.07086	1.04	0.19	0.40
224-225	60.34	0.2655	0.8618	0.06535	1.03	0.18	0.40
225-226	53.19	0.2355	0.8435	0.05797	1.04	0.2	0.39
226-227	36.75	0.1673	0.8083	0.04117	1.07	0.26	0.42
227-228	37.77	0.1695	0.71	0.04171	1.06	0.23	0.42
228-229	54.84	0.2433	0.8613	0.05987	1.04	0.2	0.39
229-230	46.99	0.2075	0.6628	0.05108	1.03	0.18	0.43
230-231	57.22	0.2552	0.8497	0.0628	1.04	0.18	0.48
231-232	49.24	0.2219	0.7648	0.05461	1.04	0.19	0.57
232-233	53.23	0.2408	0.7706	0.05927	1.03	0.18	0.66
233-234	44.28	0.2065	0.7208	0.05083	1.04	0.19	0.87
234-235	35.82	0.1685	0.6185	0.04146	1.04	0.2	0.91
235-236	58.35	0.258	0.8059	0.0635	1.03	0.17	1.22
236-237	44.66	0.2008	0.7614	0.04943	1.05	0.21	1.24
237-238	54.77	0.2554	0.7777	0.06285	1.03	0.17	1.51
238-239	37.03	0.19	0.6956	0.04675	1.04	0.2	1.48
239-240	47.02	0.255	0.5688	0.06276	1.02	0.12	1.59
240-241	43.47	0.2317	0.5294	0.05701	1.02	0.13	1.48
241-242	51.46	0.2701	0.5559	0.06646	1.01	0.12	1.41

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИАЦИЙ ДУФ ПО МОДЕЛЬНЫМ РАСЧЕТАМ

Модель позволяет получить значения потоков излучения во всех участках спектра рассматриваемого интервала $115 \leq \lambda \leq 242$ нм. При этом могут быть использованы не только данные текущих измерений входного параметра $N_{L\alpha}$ но и архивные данные или его модельные оценки по каким-либо другим данным, например по индексу солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$ или по данным о критических частотах слоя E ионосферы [Нусинов 2004]. На рис. 2 приведены модельные спектры, рассчитанные для максимального (сплошная линия) и минимального (штриховая линия) значений $N_{L\alpha}$, приведённых в базе данных LISIRD за период с 1947 по 2018 гг. (соответственно $N_{L\alpha} = 3.31 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в 2018 г. и $7.12 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в 1947 г.).

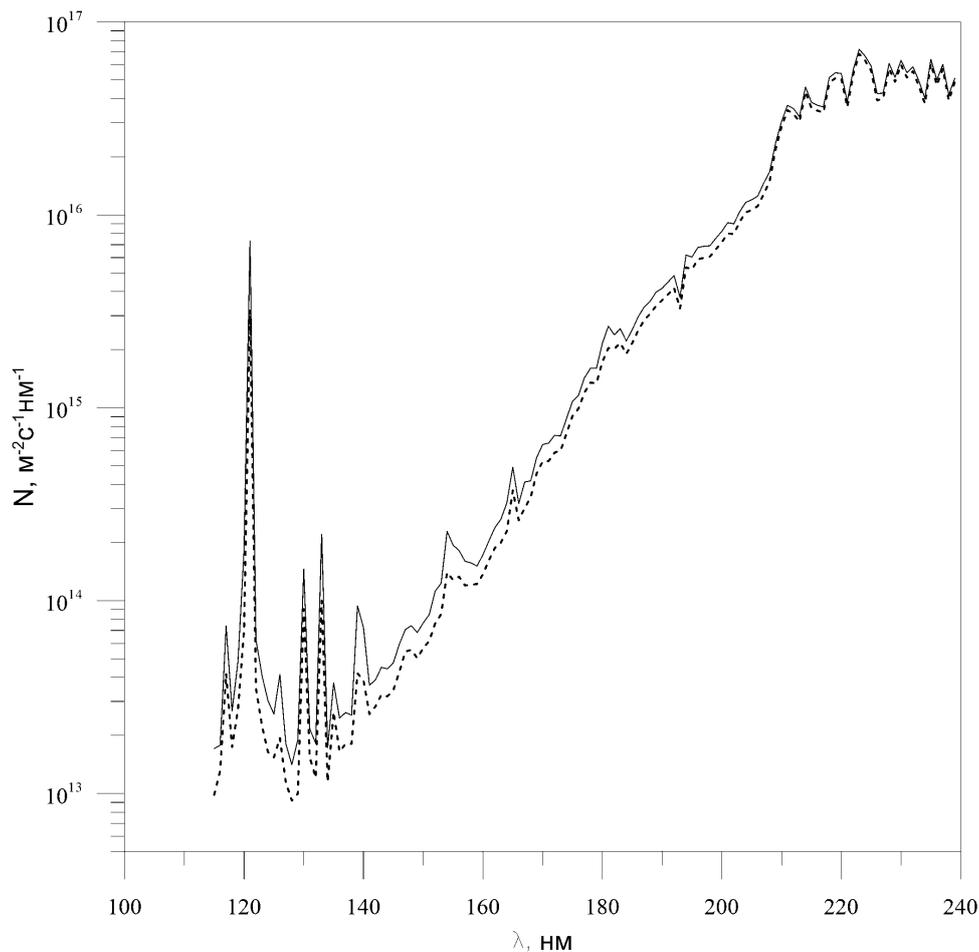


Рис. 2. Модельные спектры для экстремальных значений индекса $N_{L\alpha}$.

Из рисунка видно, что при переходе от низкой солнечной активности к высокой потоки ДУФ почти не различаются в области спектра $\lambda > 210$ нм. Изменения заметно возрастают при переходе к более коротким длинам волн. Можно оценить максимальные значения изменчивости V (отношения потоков излучения для максимального и минимального уровня солнечной активности при заданной длине волны) по архивным данным LISIRD. Результаты модельных расчетов изменчивости потоков ДУФ при различных длинах волн представлены на рис. 3. Пунктирная линия соответствует

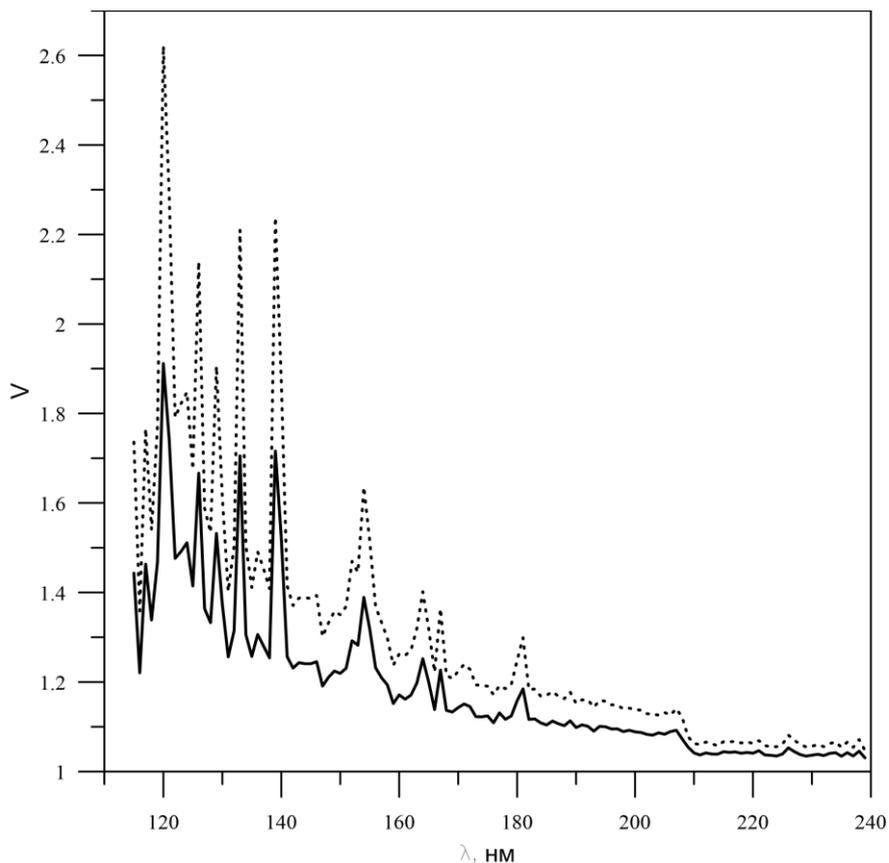


Рис. 3. Степень изменчивости спектра ДУФ в зависимости от длины волны

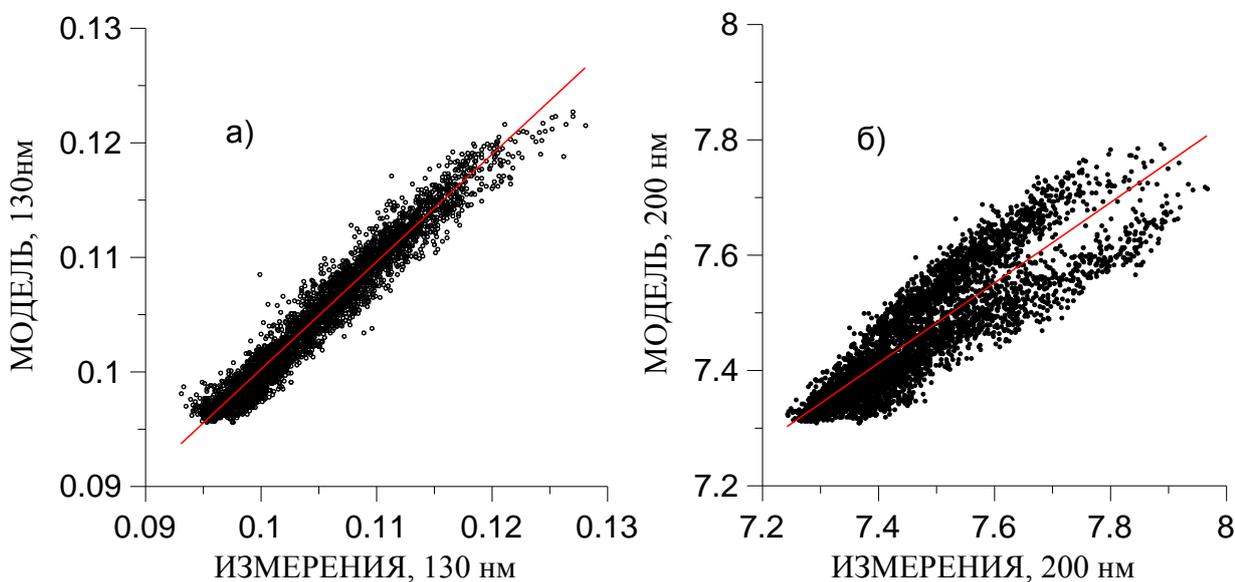


Рис. 4 Сравнение измеренных и рассчитанных по модели потоков интервалах длин волн 130-131 нм (а) и 200-201 нм (б). Красные линии – линейная аппроксимация. Все данные на рисунке – в единицах $\text{фотон м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{нм}^{-1}$.

Точечная линия – для экстремальных суточных значений, сплошная линия для экстремальных значений $N_{L\alpha}$, средних за 3 солнечных оборота. приведенным выше значениям $N_{L\alpha}$ за 1947-2018 гг. Ввиду инерционности процессов в верхней атмосфере отдельные экстремальные значения, приходящиеся на сравнительно короткие (одни или несколько суток) интервалы времени вряд ли целесообразно использовать при модельных расчетах

или оценках параметров верхней атмосферы. Сплошная линия на рис. 3 соответствует экстремальным величинам временного ряда, полученного путем вычисления скользящего среднего за три солнечных оборота (81 сут.) суточных значений $N_{L\alpha}$ (соответственно $N_{L\alpha} = 3.5 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $6.1 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$). Использование такого временного интервала типично при оценках состояния ионосферы и верхней атмосферы и приводит к более реалистичным оценкам вариаций. Как видно из рис. 3, интенсивность ДУФ-излучения может в циклах активности изменяться на десятки процентов, но при больших длинах волн изменения становятся незначительными и составляют при $\lambda > 210 \text{ нм}$ лишь около 4%. Адекватность модели была проверена также путем сравнения измеренных и рассчитанных значений потоков в отдельных интервалах и во всем спектре. На рисунке 4 приведено сравнение измеренных и рассчитанных по модели потоков интервалах длин волн 130-131 нм (а) и 200-201 нм (б).

На первый взгляд, более значительный разброс точек на рис. 4б. вызывает некоторые сомнения. Однако в обоих случаях значения коэффициентов детерминации (0.78 и 0.95 для интервалов 200-201 и 130-131 нм соответственно) позволяют заключить, что представленная модель хорошо описывает солнечный спектр в области ДУФ.

Результаты дополнительной проверки приведены в следующем разделе.

ПРОВЕРКА МОДЕЛИ НА ДАННЫХ TIMED/SEE

Проверка модели проводилась с использованием данных измерений аппаратурой TIMED/SEE, калибровка которой, а также методы устранения эффектов деградации аналогичны используемым в аппаратуре SORCE/SOLSTICE (см. например, [Woods et al. 2005, 2018]). На рис. 5 приведены результаты сравнения модельных расчетов с измерениями на TIMED для эпох максимума и минимума солнечной активности в 23-м солнечном цикле. Видно, что для всего диапазона длин волн 115-190 нм результаты модельных расчетов практически совпадают с измерениями как при высокой, так и при низкой солнечной активности. Следует отметить, что уровень высокой активности приходится на период, когда измерения на SORCE, по которым разработана модель, ещё не проводились. Можно полагать, что модель адекватно описывает изменения спектра ДУФ при любом уровне солнечной активности и в любом солнечном цикле.

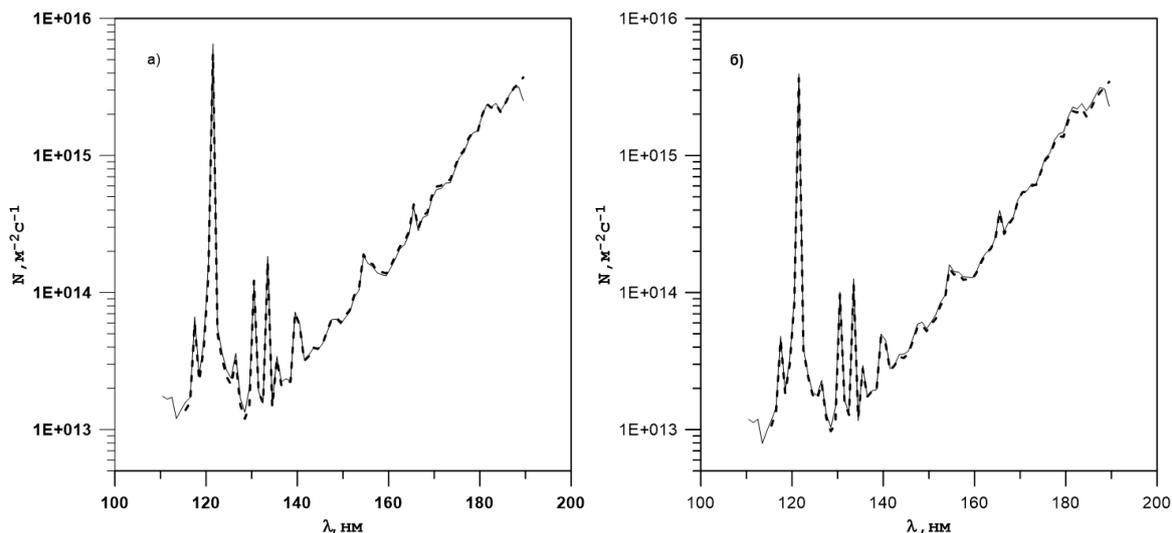


Рис. 5. Сравнение модельных расчетов с данными TIMED/SEE. а) Вблизи максимума активности, 21.02.2002, б) Вблизи минимума активности, 21.02.2009. Сплошная линия – данные измерений, штриховая линия – расчет по модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. В итоге сопоставления потоков солнечного далекого ультрафиолетового излучения (ДУФ) в спектральной области 115-242 нм, измеренных на космическом аппарате SORCE в течение 23-24 циклов активности, выявлено, что вариации излучения во всех 1-нм интервалах этой области тесно связано с изменением интенсивности излучения в линии L_{α} ($\lambda=121.6$ нм). Связь интенсивностей в отдельных интервалах с интенсивностью L_{α} близка к линейной при любом уровне солнечной активности, отклонения наблюдаемых величин потоков от линейной зависимости в среднем составляют около 1% при любых уровнях солнечной активности 23 – 24 циклов.

2. Использование этой закономерности сделало возможной разработку модели спектра ДУФ, позволяющую рассчитать спектр в области 115-242 нм для любого уровня солнечной активности с погрешностью около 1-2%. Входным параметром для модели является интенсивность L_{α} , измерения которой проводятся в течение уже нескольких десятилетий. Использование модели позволяет рассчитать потоки солнечного ДУФ-излучения в 1-нм интервалах для любых уровней солнечной активности, а также и любых периодов времени используя как данные текущих измерений потока в линии L_{α} , так и архивные данные. При отсутствии прямых измерений величина потока в этой линии может быть восстановлена с помощью архивных данных о традиционных индексах – числе солнечных пятен W , потока радиоизлучения $F_{10.7}$ на волне 10.7 см или по данным о критических частотах E-слоя ионосферы.

Авторы выражают благодарность коллективу Лаборатории физики атмосферы и космического пространства (LASP) Университета Колорадо за представление данных измерений крайнего ультрафиолетового излучения Солнца для широкого научного пользования во всемирной сети.

ЛИТЕРАТУРА

- Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. – Л.: Гидрометиздат, 1980. – 190 с.
- Нусинов А.А. Ионосфера как природный детектор для исследования долговременных изменений потоков солнечного геоэффективного излучения // Геомагн. и аэрномия. 2004. Т. 44, №6. С. 779–786.
- Нусинов А.А., Казачевская Т. В., Катюшина В. В., Свидский П. М., Гонюх Д. А. Вариации потоков крайнего ультрафиолетового излучения с различными масштабами времени по измерениям на ИСЗ "КОРОНАС" (Эксперимент СУФР-СП-К и ВУСС-Л) // В кн. "Солнечно-Земная Физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф". Москва. Физматлит. 2009.
- Окабе, Х. Фотохимия малых молекул / Перевод с англ. М.Д. Козьменко, Н.А. Садовского, под ред. М.Г. Кузьмина. - М.: Мир, 1981. - 504 с.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н. Модель вертикального распределения концентрации атомарного кислорода в области мезопаузы и нижней термосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 6. С. 844-855.
- Ball W. T., Unruh Y.C., Krivova N.A., Solanki S. and Harder J. W. Solar irradiance variability: a six-year comparison between SORCE observations and the SATIRE model //Astronomy & Astrophysics. V.530, № A71. 2011
- Chamberlin P. C., Woods T. N., Crotser D. A., Eparvier F. G., Hock R. A., Woodraska D.L.. New, Higher Resolution Solar Extreme Ultraviolet (EUV) Irradiance Results for Solar Cycle Minimum Conditions on April 14, 2008. Geophys. Res. Lett. V.36. № 5. CitelD L05102. 2009.
- Dewolfe W. A., Wilson A., Lindholm D. M., Pankratz C. K., Snow M. A., Woods T. N. Solar Irradiance Data Products at the LASP Interactive Solar Irradiance Data Center (LISIRD) //AGU 2010 GC21B-0881.
- Ermolli I., Matthes K, Dudok de Wit T., Krivova N. A., Tourpali K., Weber M., Unruh Y C., Gray L., Langematz U., Pilewskie P., Rozanov E., Schmutz W., Shapiro A., Solanki S. K., Woods T. N. Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling // Atmospheric Chemistry and Physics. V. 13, № 8. P. 3945-3977 . 2013
- Lean J. L., Rottman G J., Kyle H. L, Woods T N., Hickey J R., Puga L C. Detection and parameterization of variations in solar mid and near ultraviolet radiation (200 to 400 nm) // J. Geophys. Res., 102, 29939-29956, 1997.

- Lean J. Evolution of the Sun's Spectral Irradiance since the Maunder Minimum // *Geophys. Res. Lett.* V.27. P. 2425-2428. 2000.
- Lean J., Rottman G., Harder J., Kopp G. *SORCE* contributions to new understanding of global change and solar variability // *Solar Phys.* V 230. № 1. P. 7-53. 2005.
- Merkel A.W., Harder J. W., Marsh D. R., Smith A. K., Fontenla J. M., Woods T. N. The impact of solar spectral irradiance variability on middle atmospheric ozone // *Geophys. Res. Lett.* V. 38. № 13. P.L13802-L13807. 2011.
- Schmidtke G. Extreme ultraviolet spectral irradiance measurements since 1946 // *History of Geo- and Space Sciences.* V. 6. № 1. P.3-22. 2015. DOI: 10.5194/hgss-6-3-2015
- Solomon S. C., Woods T. N., Didkovsky L.V., Emmert J. T., Qian L. Anomalously low solar extreme- ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum // *Geophysical Research Letters*, 2010. V. 37. L16103, doi:10.1029/2010GL044468.
- Sparr T. P., Rottman G., Woods T. N., Boyle B. D., Kohnert R., Ryan S., Davis R., Fulton R., Ochs W. The *SORCE* spacecraft and operations // *Solar Physics.* 2005. V. 230. P 71–89
- Woods, T. N., Eparvier F. G., Bailey S. M., Chamberlin P. C., Lean J., Rottman G. J., Solomon S. C., Tobiska W. K., Woodraska D. L. The Solar EUV Experiment (SEE): Mission overview and first results, *J. Geophys. Res.*, 110, A01312, doi: 10.1029/2004JA010765, 2005.
- Woods T. N., Lean J. Anticipating the next decade of Sun-Earth system variations // *EOS, Transactions American Geophysical Union.* V. 88, No. 44. P. 457-458. 2007.
- Woods T. N. Recent advances in observations and modeling of the solar ultraviolet and X-ray spectral irradiance. *Advances in Space Research.* V. 42. № 5. P. 895-902. 2008.
- Woods T.N., Chamberlin P.C., Harder, J.W., Hock, R A., Snow M., Eparvier F. G., Fontenla J., McClintock W. E., Richard E. C. Solar irradiance reference spectra (SIRS) for the 2008 Whole Heliosphere Interval (WHI) // *Geophys. Res. Lett.* 36. L01101. doi: 101029/2008GL036373. 2009.
- Woods T. N., Eparvier F. G., Harder J., Snow M. Decoupling Solar Variability and Instrument Trends using the Multiple Same-Irradiance-Level (MuSIL) Analysis Technique // *Solar Phys.* V293. № 5. Id. 76. 21PP. 2018.
- Yeo K. L., Ball W. T., Krivova N. A., Solanki S. K., Unruh Y. C., and J. Morrill, UV solar irradiance in observations and the NRLSSI and SATIRE-S models // *J. Geophys. Res. Space Physics.* V 120. P 6055–6070. doi:10.1002/2015JA021277. 2015.

MODEL OF SOLAR FAR ULTRAVIOLET RADIATION FLUXES

A.A. Nusinov, T.V. Kazachevskaya, V.V. Katyushina

An approach has been developed to create a model of far-ultraviolet radiation spectrum of the Sun (FUV) in the wavelength region responsible for the dissociation of molecular oxygen (115-242 nm). The model is based on the concept of linear dependence of the radiation fluxes in the intervals of 1 nm width on the intensity of the Lyman-alpha hydrogen line (it is supposed to be measured by ultraviolet radiation photometers installed on space segment heliogeophysical service satellites). The coefficients of the linear dependence are obtained for each of these intervals. Comparison of model calculations results with the observations shows that the model error does not exceed 1-2%, that is sufficient for the purposes of calculating the state of the thermosphere.

KEYWORDS: SUN, SOLAR SPECTRAL IRRADIATION, SOLAR FAR ULTRAVIOLET RADIATION MODEL