

УДК 551.521.17

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИНДЕКСА

Н.С. Иванова

*Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный
oot@cao-rhms.ru*

В статье представлена новая эмпирическая модель расчета ультрафиолетового индекса и результаты ее тестирования по данным зарубежных и отечественных озонметрических станций. Входными параметрами модели, кроме высоты Солнца над горизонтом, являются данные сетевых измерений общего содержания озона и количества общей и нижней облачности, а также высота озонметрической станции над уровнем моря. Модель позволяет достаточно корректно оценивать значения УФ-индекса у поверхности Земли на высотах до 600 м над уровнем моря при высоте Солнца над горизонтом до 70°, а также может быть использована для прогноза или исторической реконструкции значений УФ-индекса.

Ключевые слова: ультрафиолетовый индекс, общее содержание озона, облачность, оправдываемость, предупрежденность опасного явления.

Ультрафиолетовый индекс (УФИ) характеризует ультрафиолетовую радиацию, взвешенную на спектр эритемного воздействия на кожу человека [15, 17, 28]. Повышенные дозы ультрафиолетовой радиации могут служить причиной возникновения многих серьезных заболеваний, в том числе и онкологических [16, 25, 29]. Поэтому во многих странах в средствах массовой информации приводятся как данные измерений УФ-индекса в околополуденное время, когда его значение ближе всего к своему максимальному значению, так и прогноз УФИ [2, 18, 19, 22–24, 26, 30]. Это позволяет населению правильно дозировать время нахождения на открытом воздухе, чтобы минимизировать риски возникновения заболеваний. В России тоже этим озаботились [1, 4, 7–9, 20], но самая большая из возникших при этом проблем – большая пространственная протяженность территории с большим количеством климатических зон (от субтропиков до Арктики). Обеспечить все регионы качественной аппаратурой для регулярных измерений УФИ проблематично и дорого. Поэтому упор делается на моделирование.

Все математические модели расчета УФИ, основанные на теории распространения излучения, требуют достаточно много входных параметров, точное ежедневное знание которых затруднено. Поэтому используются, как правило, различные их приближения [13, 14,

21, 27]. Как альтернатива сложным численным моделям создаются эмпирические модели, позволяющие проще и быстрее оценивать и прогнозировать значения УФ-индекса [5, 10, 11].

В данной работе предпринята попытка улучшить разработанную ранее эмпирическую модель оценки и прогноза УФ-индекса, которая в 2010 г. была одобрена Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета [2], за счет введения дополнительных параметров. Ранее расчет УФ-индекса проводился на основе оценки УФ-радиации «Б» диапазона (290–315 нм). Новая модель разработана непосредственно на основе доступных результатов измерений эритемно-взвешенной УФ-радиации, которая пропорциональна УФ-индексу. Входными параметрами модели, кроме высоты Солнца над горизонтом, являются данные сетевых измерений общего содержания озона (ОСО) и количества общей и нижней облачности (КОО и КНО), а также высота озонметрической станции над уровнем моря. Для построения модели были использованы как наиболее точные данные прибора Брюер на станции Торонто, представленные на сайте WOUDC [31]. Географические координаты станций, данные которых использовались в работе, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Озонметрические станции, данные которых использовались для тестирования

Станция	Широта	Долгота	Высота, м
Торонто	43,78° с. ш.	79,47° з. д.	198
Халифакс	44,74° с. ш.	63,67° з. д.	69
Саскатун	52,11° с. ш.	106,71° з. д.	550
Регина	50,21° с. ш.	104,71° з. д.	592
Архангельск	64,58° с. ш.	40,50° в. д.	8
Большая Елань	46,92° с. ш.	142,73° в. д.	22
Николаевск-на-Амуре	53,15° с. ш.	140,70° в. д.	46
Обнинск	55,50° с. ш.	36,20° в. д.	186
Томск	56,48° с. ш.	85,05° в. д.	191
Якутск	62,08° с. ш.	129,75° в. д.	98

При построении новой модели расчета УФ-индекса в качестве исходных данных для каждого случая были взяты значения ОСО и проинтегрированные значения эритемно-взвешенной УФ-радиации IntCIE за май – август 1999–2000 гг. при высоте Солнца выше 20° над горизонтом (всего 4049 случаев). Такой выбор станции и временного интервала

объясняется желанием использовать максимальный динамический диапазон УФ-индекса и не перегружать статистику малыми значениями УФ-индекса. Для характеристики облачности были взяты самые близкие по времени значения общей и нижней облачности, измеряемые на ближайшей метеорологической станции каждый час.

В результате было получено следующее аналитическое соотношение, позволяющее довольно просто и быстро оценить значение УФ-индекса при отсутствии снежного покрова, если известны значения ОСО и параметры облачности:

$$UVI_M = 36,28 \cdot (1 + 0,16 \cdot H^2) \cdot A(b, l) \cdot B(V) / X^{0,991}, \quad (1)$$

$$A(b, l) = (82,2 + 3,398 \cdot b - 3,6615 \cdot b^2 + 1,35084 \cdot b^3 - 0,26675 \cdot b^4 + 0,0254699 \cdot b^5 - 0,000947 \cdot b^6) \cdot (1 - F) + (82,2 + 0,983 \cdot b - 0,9408 \cdot b^2 + 0,19847 \cdot b^3 - 0,012871 \cdot b^4) \cdot F, \quad (2)$$

$$F(b, l) = 1 + 3,044 \cdot s - 13,1195 \cdot s^2 + 18,75302 \cdot s^3 - 9,697014 \cdot s^4 - 0,0001 \cdot s \cdot (1 - s) \cdot b^4, \quad (3)$$

$$s = l / (b + 0,0001), \quad (4)$$

$$B(V) = 0,0049 + 0,0664 \cdot \sin V - 2,2779 \cdot \sin^2 V + 19,178 \cdot \sin^3 V - 49,608 \cdot \sin^4 V + 55,847 \cdot \sin^5 V - 22,185 \cdot \sin^6 V, \quad (5)$$

где UVI_M – модельное значение УФ-индекса; H – высота станции над уровнем моря, км; b – количество общей облачности, балл; l – количество нижней облачности, балл; V – угол Солнца над горизонтом, град.; X – общее содержание озона, ед.Д.

Проверка разработанной модели проводилась по экспериментальным данным, измеренным различающимися по точности приборами. В первую очередь для проверки модели были взяты данные приборов Брюер, представленные на сайте WOUDC [31]. Модель проверялась по данным канадских станций Саскатун (1785 случаев), Регина (2408 случаев) и Халифакс (806 случаев) за май – август 2000 г., а также проводилась проверка модели по данным прибора Брюер, расположенного в Обнинске (1353 случая), за май – август 2016 г. (рис. 1). Как и для Торонто, в каждом случае использовались результаты измерения ОСО и значения эритемно-взвешенной УФ-радиации IntCIE, а параметры облачности брались с ближайшей метеостанции, где они измерялись ежедневно [www.pogodaiklimat.ru].

В табл. 2 для каждой станции представлены результаты сравнения двух моделей (ранее утвержденной ЦМКП и новой) по следующим параметрам: среднее значение разности, стандартное отклонение и среднеквадратическое отклонение разности рассчитанных по модели

и измеренных значений УФИ. Там же в процентах приводится доля количества случаев, когда значения данной разности не превышают по модулю 1 и 2.

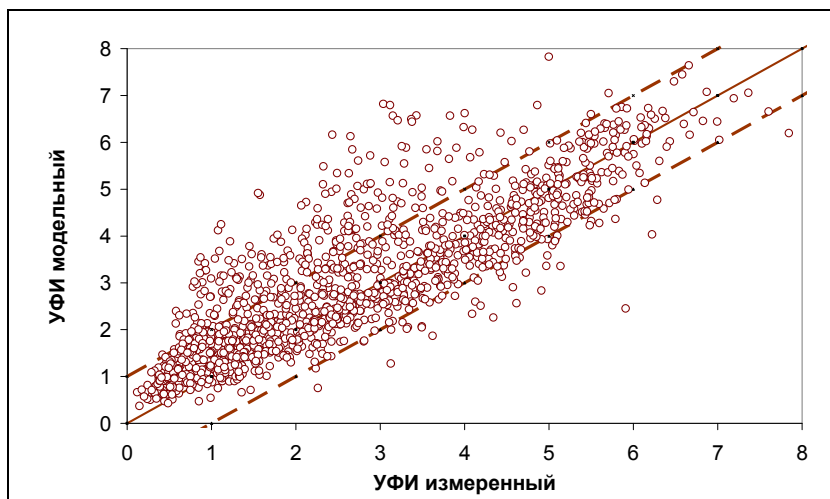


Рис. 1. Сравнение рассчитанных и измеренных значений УФ-индекса в Обнинске (Brewer, май – август 2016 г.).

Таблица 2. Результаты сравнения расчета УФИ ($УФИ_{\text{мод}}$) и измеренного индекса ($УФИ_{\text{изм}}$) предыдущей версии модели УФИ (M) и новой версии (M_n)

Станция	$УФИ_{\text{мод}} - УФИ_{\text{изм}}$						$ УФИ_{\text{мод}} - УФИ_{\text{изм}} \leq 1$, % случаев		$ УФИ_{\text{мод}} - УФИ_{\text{изм}} \leq 2$, % случаев	
	Среднее значение разности		Стандартное отклонение		Среднеквадратическое отклонение		M	M _n	M	M _n
	M	M _n	M	M _n	M	M _n				
Торонто	0,22	0,04	0,99	0,91	1,01	0,91	78,1	82,7	92,6	94,8
Саскатун	0,20	-0,03	0,97	0,93	0,99	0,94	78,8	81,7	91,3	93,7
Регина	0,04	-0,09	1,02	1,01	1,02	1,01	74,8	78,9	92,0	92,8
Халифакс	0,10	-0,08	0,99	0,94	0,99	0,94	73,3	79,7	93,7	94,3
Архангельск	0,62	0,39	0,64	0,63	0,89	0,73	77,5	87,4	99,1	99,1
Б. Елань	0,13	0,14	1,53	1,23	1,53	1,23	51,0	57,1	79,6	91,8
Николаевск-на-Амуре	0,91	0,88	1,35	1,22	1,62	1,50	39,4	54,9	78,9	80,3
Обнинск	0,74	0,32	0,93	0,87	1,19	0,93	65,3	78,8	89,2	94,5
Томск	0,55	-0,02	0,79	0,66	0,95	0,65	71,0	87,1	96,8	100
Якутск	0,29	0,20	0,77	0,66	0,82	0,69	78,3	87,7	99,1	99,1

Второй этап проверки разработанной модели проходил с использованием данных отечественных озонметров М-124, усовершенствованных для измерения эритемно-взвешенной УФ-радиации. Озонетрами М-124 УФ-радиация измеряется один раз в сутки в солнечный полдень, в отличие от спектрофотометров Брюера, которые проводят измерения несколько десятков раз в день. Одновременно с измерениями УФ-радиации проводятся измерения количества общей облачности. Но синхронные данные о количестве нижней облачности оказались доступными автору только благодаря предоставлению такой информации С.В. Смирновым и другими сотрудниками Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в г. Томске. На остальных станциях значения КНО брались с ближайшей метеорологической станции за ближайший срок измерения (www.pogodaiklimat.ru). Иногда они оказывались больше значений количества общей облачности, зафиксированных на озонметрической станции. Тогда при расчете УФ-индекса по новой модели в качестве КНО использовалось значение КОО, измеренное одновременно с УФ-радиацией на озонметрической станции.

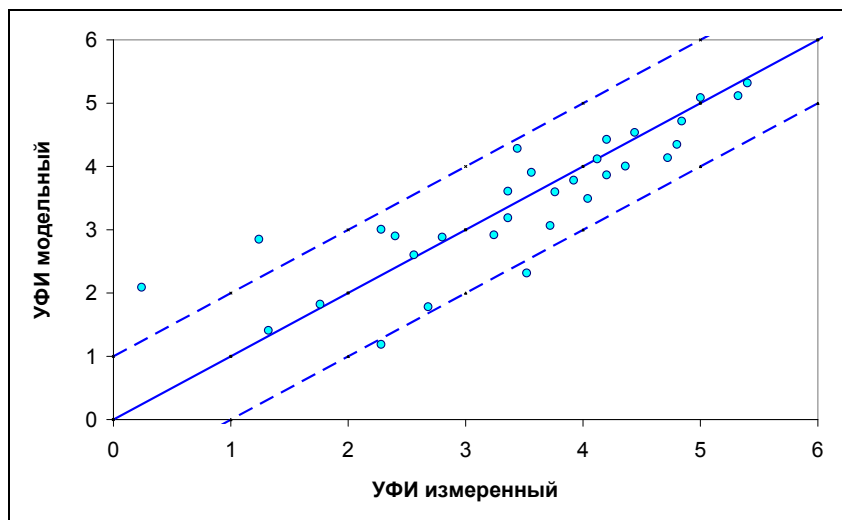


Рис. 2. Сравнение рассчитанных и измеренных значений УФ-индекса в Томске (М-124, август 2016 г.).

Для тестирования новой модели проводился строгий отбор пунктов, отвечающих следующим требованиям: 1) имеют удовлетворительное соответствие результатов измерения среднесуточного ОСО озонметром М-124 и спутниковых данных [3]; 2) солнечный полдень на долготах выбранных станций близок по времени к стандартным срокам

измерения параметров облачности на ближайших метеорологических станциях, данные которых использовались для проверки модели (не более получаса); 3) приборы, используемые на этих станциях, проходили градуировку в 2015 и 2016 гг., и ГГО их данные не забраковала. Таких станций оказалось немного: Архангельск (111 случаев), Большая Елань (49 случаев), Николаевск-на-Амуре (71 случай), Томск (31 случай) и Якутск (106 случаев). Результаты сравнения рассчитанных и измеренных значений УФИ для выбранных станций за летний период 2016 года также приведены в табл. 2.

Так как модель расчета УФИ разрабатывалась с прогностической целью, то целесообразно оценить не только ее статистические характеристики, но и качество расчета опасных уровней УФ-индекса. Опасным явлением считается значение УФИ, превышающее 5,5 [6]. Рассчитывались эквиваленты оправдываемости и предупрежденности опасного явления, поскольку проверка прогностических качеств модели проводилась по экспериментальным, а не спрогнозированным данным. Здесь следует отметить, что в расчетах УФИ для отечественных станций вместо синхронных значений использовались среднесуточные значения общего содержания озона и параметры общей и нижней облачности, соответствующие ближайшему сроку наблюдений. Назовем принятые обозначения:

- оправдываемость явлений $U_{я}$ – это отношение числа успешных прогнозов (в данном случае расчетов) наличия опасного явления к общему числу прогнозов (расчетов) опасных явлений;
- предупрежденность явлений $\Pi_{я}$ – это отношение числа успешных прогнозов (расчетов) наличия опасного явления к фактическому числу случаев с опасным явлением.

Довольно часто по критериям различного вида затруднительно сделать правильное заключение о надежности методов краткосрочных прогнозов опасных явлений погоды. В решении данного вопроса вполне эффективным может быть суммарный показатель $(U_{я} + \Pi_{я})$, характеризующий наиболее важные стороны метода [6].

Принято считать, что величина $U_{я} + \Pi_{я} \geq 130\%$ характеризует удовлетворительное качество прогнозов. В табл. 3 приводятся оправдываемость $U_{я}$ и предупрежденность $\Pi_{я}$ опасных явлений, а также сумма этих характеристик в процентах. В ней отсутствуют станции Архангельск и Якутск, так как на этих северных станциях из-за низкой высоты Солнца значения УФ-индекса больше 5,5 не регистрировались; а также Томск, так как данные из Томска стали поступать с августа 2016 года.

Приведенные результаты испытания разработанной новой модели расчета УФИ на массивах данных, полученных аппаратурой с различными точностными характеристиками, показали ее работоспособность.

Видно, как рост погрешности измерительной аппаратуры приводит к заметному ухудшению статистики результатов сравнения измеренных и рассчитанных значений УФ-индекса. Возможно, что на это также влияет использование при проверке модели по отечественным данным вместо синхронных значений общего содержания озона его среднесуточных значений.

Таблица 3. Показатели качества расчетов опасных уровней УФИ предыдущей версии модели УФИ (M) и новой версии (M_n)

Станция	Оправдываемость, $U_{я}$, %		Предупрежденность, $P_{я}$, %		$U_{я} + P_{я}$, %	
	M	M_n	M	M_n	M	M_n
Торонто	82	83	82	85	164	168
Саскатун	74	76	67	69	141	145
Регина	86	83	71	74	156	157
Халифакс	86	81	53	65	139	146
Большая Елань	83	82	76	92	159	174
Николаевск-на-Амуре	48	43	79	93	126	136
Обнинск	42	53	81	70	123	123

Сравнение двух разных методик расчета УФИ по данным, приведенным в табл. 2 и 3, показывает преимущество новой методики. Если по методике, прошедшей ЦМКП, значения среднеквадратических разностей рассчитанных и измеренных значений УФ-индекса для разных станций лежат в диапазоне от 0,82 в Якутске до 1,62 в Николаевске-на-Амуре, то при расчете по новой методике они лежат в диапазоне от 0,65 в Томске до 1,50 в Николаевске-на-Амуре. На всех станциях значения среднеквадратической разности рассчитанных и измеренных значений УФ индекса уменьшились на величину от 1 % в Регине до 32 % в Томске, где проводились синхронные измерения УФ-радиации и количества общей и нижней облачности.

Доля случаев, когда значения разности рассчитанных и измеренных значений УФ-индекса лежат в интервале от -1 до 1, на всех станциях возросла. При расчете по старой методике эта доля колеблется от 39 % в Николаевске-на-Амуре до 79 % в Саскатуне, а при расчете по новой методике это число колеблется от 55 % в Николаевске-на-Амуре до 88 % в Якутске. На всех станциях, кроме Обнинска, возрастает предупреденность и сумма оправдываемости и предупреденности опасного явления. В Обнинске предупреденность опасного явления снизилась, но возросла оправдываемость, так что их сумма осталась неизменной.

Выводы

Проведенные исследования приводят к заключению, что новая разработанная модель позволяет просто, быстро и достаточно корректно оценивать значения УФ-индекса у поверхности Земли на высотах до 600 м над уровнем моря при высоте Солнца над горизонтом до 70°. Модель может быть дополнительно адаптирована к региональным условиям введением поправочного коэффициента, если региональное значение прозрачности атмосферы существенно отличается от его среднестатистического значения. Как старая, так и новая модели могут быть использованы для прогноза или исторической реконструкции значений УФ-индекса, если спрогнозированы или заархивированы значения общего содержания озона и используемые в моделях параметры облачности.

Выражаю благодарность С.В. Смирнову и сотрудникам Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск) за проведение и предоставление специализированных данных; а также сотрудникам лаборатории контроля озонового слоя атмосферы отдела мониторинга и исследований химического состава атмосферы ГГО им А.И. Воейкова г. Санкт-Петербурга за многолетнее сотрудничество и предоставление проконтролированных озонметрических данных и данных УФ-радиации.

Поступила в редакцию 21.05.2017 г.

Список использованных источников:

1. *Ананьев Л.Б., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Кузнецова И.Н.* О прогнозировании общего содержания озона и УФ-индекса на территории России: проблемы и перспективы // Межд. конф. по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "Enviomis-2008". Тезисы докладов. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2008.
2. *Иванова Н.С.* Методы прогноза общего содержания озона и УФ-индекса. 2010. <http://method.meteorf.ru/methods/pollut/uv/uv.html>.
3. *Иванова Н.С.* Сравнение наземных и спутниковых результатов измерения общего содержания озона летом 2016 г. // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 94-100.
4. *Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Черников А.А.* Создание первой очереди системы мониторинга УФ-радиации в России // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 1. С. 5-9.
5. *Иванова Н.С., Терев Н.В.* Метод суточного прогноза среднеинтегральной за период не менее 4 часов облученности земной поверхности солнечной ультрафиолетовой радиацией Б-диапазона (длины волн до 315 нм) и результаты его испытания // Информационный сборник № 30. Результаты испытания новых и усовершенствованных методов и моделей гидрометеорологических прогнозов. 2002. С. 141-150.
6. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов.

- РД 52.27.284-91. М.: Гидрометеоздат. 1991. 150 с.
7. Нахаев М.И., Ананьев Л.Б., Иванова Н.С., Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю. Ультрафиолетовая облученность, УФ-индекс и их прогнозирование // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 173-187.
 8. Чубарова Н.Е. Мониторинг биологически активной УФ радиации в Московском регионе // Известия РАН. ФАО. 2002. Т. 38, № 3. С. 354-365.
 9. Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю. Ультрафиолетовые ресурсы при ясном небе на территории России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2012. № 6. С. 9-19.
 10. Allaart M., van Weele M., Fortuin P., Kelder H. An empirical model to predict UV-index based on the solar zenith angles and total ozone // Meteorol. Appl. 2004. V. 11. P. 59-65.
 11. Antón M., Serrano A., Cancillo M.L., Garcia J.A. An empirical model to estimate ultraviolet erythema transmissivity // Ann. Geophys. 2009. Vol. 27. P. 1387-1398.
 12. Bodeker G., Burrows J., Scott-Weekly R., Nichol S.E., McKenzie R.L. A UV atlas for New Zealand, in UV Radiation and its Effects. R. Soc. of N.Z., Wellington. 2002.
 13. Chubarova N., Zhdanova Ye. Ultraviolet resours over Northen Eurasia // J. Photoch. Photobio. B. Biology. 2013. Vol. 127. P. 38-51.
 14. Damski J., Thölix L., Backman L., Taalas P., Kulmala M. FinROSE-Middle atmospheric chemistry transport model // Boreal. Environ. Res. 2007. Vol. 12. P. 535-550.
 15. Diffey B.L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems // Phys. Med. Biol. 1991. Vol. 36. P. 299-328.
 16. Engelsen O., Brustad M., Aksnes L., Lund E. UV radiation, vitamin D and human health: an unfolding controversy daily duration of vitamin D synthesis in human skin with relation to latitude, total ozone, altitude, ground cover, aerosols and cloud thickness // J. Photoch. Photobio. 2005. Vol. 81. P. 1287-1290.
 17. Fioletov V., Kerr J.B., Fergusson A. The UV Index: Definition, Distribution and Factors Affecting It // Can. J. Public Health. 2010. Vol. 101 (4). P. 15-19.
 18. Fioletov V.E., Kerr J.B., McArthur L.J.B., Kerr J.B., Wardle D.I., Mathews T.W. Estimating UV Index Climatology over Canada // J. Appl. Meteorol. 2003. Vol. 42. P. 417-433.
 19. Fioletov V.E., Kimlin M.G., Krotkov N., McArthur L.J.B., Kerr J.B., Wardle D.I., Herman J.R., Meltzer R., Mathews T.W., Kaurola J. UV index climatology over the United States and Canada from ground-based and satellite estimates // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. D22308.
 20. Ivanova N.S., Kruchenitsky G.M. UV-B monitoring system in Russia // Proc. Quadr. Ozone Symp, Sapporo. 2000. P. 285-286.
 21. Kylling A. UVspec, a program for calculation of diffuse and direct UV and visible fluxes and intensities at any altitude, available by anonymous ftp to ka-ja.gi.alaska.edu, cd pub/arve. 1995.
 22. Litynska Z., Koepke P. et al. Long term changes and climatology of UV radiation over Europe // ESSEM COST Action 726. 2010. P. 1-127. <http://www.cost.esf.org>.
 23. McKenzie R.L., Björn L.O., Bais A., Ilyasd M. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface // Photochem. Photobiol. Sci. 2003. Vol. 2 (1). P. 5-15.
 24. Seckmeyer G., Pissula D., Glandorf M. et al. Variability of UV Irradiance in Europe // J. Photoch. Photobio. 2008. Vol. 84. P. 172-179.
 25. Urbach F. Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer // J. Photoch. Photobio. 1989. Vol. 50, No. 4. P. 507-513.
 26. Vanicek K., Frei T., Litynska Z., Schnalwieser A. UV-Index for public. ESSEM COST Action 713. 2000. P. 27.
 27. Wohltmann I., Rex M. The Lagrangian chemistry and transport model ATLAS: Validation of advective transport and mixing // Geosci. Model Dev. 2009. Vol. 2. P. 153-173.
 28. World Health Organization (WHO). Global Solar UV Index. A Practical Guide. WHO/SDE/02.2. 2002.

29. World Health Organization (WHO). Protection against exposure to ultraviolet radiation. Technical Report WHO/EHG 17. 1995.

30. World Meteorological Organization (WMO). Report of WMO-WHO meeting of experts on standardization of UV indices and

their dissemination to the public. Technical Report 127. WMO/Global Atmosphere Watch. 1998.

31. World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Center (WOUDC). <http://exp-studies.tor.ec.gc.ca> , <http://woudc.org>

SUMMARIES

An empirical model of ultraviolet index calculation / Ivanova N.S. // Proceedings of the Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 365. P. 118-127.

This paper presents a new empirical model for calculating the UV index and the results of its validation using data from foreign and domestic ozonometer stations. The model's input parameters, apart from the sun's height above the horizon, are network measurements of total ozone, total and lower cloud amount as well as ozonometer station elevation.

The model enables sufficiently accurate evaluation of surface UV index value at heights up to 600 m a.s.l., at the sun's height above the horizon up to 70°. It can also be used for the UV index forecasting and historical retrieval.

Keywords: ultraviolet index, total ozone, total and lower cloudiness mean value, forecast skill score, hazard awareness.