

УДК 551.521.31
**МОНИТОРИНГ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ
В МО МГУ**

Е.В. Горбаренко¹, Н.А. Бунина¹

¹ *Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
Географический факультет, E-mail: catgor@mail.ru*

Аннотация: *на основе многолетних актинометрических наблюдений Метеорологической обсерватории МГУ получены статистически достоверные данные по ФАР с различным временным разрешением (час, сутки, месяц, год), отражающие климатические особенности ФАР Московского региона. Дана оценка факторов, определяющих изменчивость ФАР. Приведены косвенные методы расчета ФАР по данным актинометрических и метеорологических станций. Проанализирована многолетняя изменчивость месячных значений ФАР. Отмечена незначимая тенденция к увеличению поступления ФАР в теплый период, что наряду с увеличением продолжительности вегетационного периода, ростом температуры и влагосодержания атмосферы, может привести к улучшению условий вегетации растений в Московском регионе.*

Ключевые слова: *мониторинг, фотосинтетически активная солнечная радиация, радиационный режим, облачность, вегетационный период.*

Актуальность. Важной составляющей радиационного режима атмосферы является солнечная радиация в интервале длин волн 380–710 нм, называемая фотосинтетически активная радиация (ФАР). ФАР играет ведущую роль в процессе фотосинтеза, на его долю в спектре солнечной радиации приходится около 42%. Информация о режиме ФАР находит применение в геоботанике, физиологии и географии растений, агрометеорологии и других областях, используется в тепличном хозяйстве, при прогнозировании продуктивности растений, фитопланктона в водоемах, при изучении круговорота углерода в природе.

В 1980 году в метеорологической обсерватории, входящей в состав кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ (МО МГУ) Т.В. Евневич и О. А. Щиловцевой были организованы наблюдения за ФАР. В настоящее время МО МГУ является единственной станцией в России, где ведется непрерывная регистрация ФАР с дискретностью в одну минуту. МО

МГУ обладает уникальным комплексом метеорологических и актинометрических наблюдений. На их базе создан банк данных; определены климатические нормы, пределы суточной, годовой, многолетней изменчивости ФАР. Получены и проанализированы зависимости ФАР от факторов, определяющих ее изменчивость, а так же разработаны косвенные методы расчета ФАР по данным суммарной интегральной радиации и продолжительности солнечного сияния.

Методика и приборы. Наблюдения за суммарной и рассеянной ФАР проводились в МО МГУ с 1980 по 2001 гг. с помощью видоизмененного пиранометра Янишевского, называемого цветной пиранометр ГГО [1]. Прибор представляет собой модификацию стандартного пиранометра М-80М. При окраске термобатареи вместо черной краски применялась киноварь, что позволило получить спектральную чувствительность пиранометра в области ФАР. Погрешность измерений ФАР цветными пиранометрами ГГО составляет 10–15%, что близко к точности измерений стандартным пиранометром. Измерения суммарной ФАР проводились в режиме регистрации с мая 1980 г. по 2002 год, а рассеянной - с мая 1983 по декабрь 1995 г. С 2002 года для регистрации ФАР используется прибор LI-190SA (www.licor.ru), измеряется только суммарная ФАР, в работе анализируется суммарная ФАР (ФАР). Спектр прибора LI-190SA (400–700 нм) несколько отличается от цветного пиранометра. Для сохранения однородности ряда ФАР на протяжении нескольких лет шли параллельные синхронные наблюдения по обоим приборам в различных погодных условиях. При всем многообразии условий (время дня, облачность, прозрачность и влагосодержание атмосферы) разница между солнечной радиацией, измеряемой LI-190 Quantum Sensor, и солнечной радиацией, измеряемой цветными пиранометрами, составляет порядка 6%. Эта величина меньше погрешности измерений ФАР, что позволило объединить в единый однородный ряд данные наблюдений по разным приборам. Подробное описание приборов и методов измерений приведено на сайте МО МГУ (www.momsu.ru). Анализ многолетней изменчивости ФАР проведен для часовых, суточных, месячных и годовых значений. В качестве факторов, регулирующих ее изменчивость, рассмотрены: продолжительность солнечного сияния в часах (ПСС), балл общей и нижней облачности, форма облаков, прозрачность атмосферы. Анализ режима облачности представлен по ежечасным визуальным наблюдениям, прозрачность атмосферы оценивается по значениям аэрозольной оптической толщины атмосферы на 550 нм (АОТ), рассчитанной по данным измерений прямой интегральной солнечной радиации по методике [2].

Результаты и обсуждение. Интенсивность ФАР испытывает как периодические, так и непериодические изменения. Периодические, закономерные изменения потоков солнечной радиации обусловлены астрономическими факторами: высота Солнца над горизонтом (h), продолжительность светового дня. Суточный ход ФАР при ясном небе имеет простой вид с максимумом в околополуденные часы. В безоблачной атмосфере наряду с астрономическими факторами, влияние на приход солнечной радиации оказывает прозрачность атмосферы для солнечных лучей и ее основная аэрозольная составляющая. При изменении АОТ от 0.1 до 0.5 при одной и той же высоте Солнца значения ФАР уменьшается от 10 до 20% в зависимости от высоты Солнца (табл.1). В сильно замутненной атмосфере ($АОТ > 1$), в условиях дымной мглы от лесных и торфяных пожаров значения ФАР уменьшаются до 70% относительно «нормальных» условий ($АОТ=0.2$) [3].

Главным естественным фактором, регулирующим радиационный режим атмосферы, является облачность. При небольшом балле верхней и средней облачности часовые суммы ФАР могут на несколько процентов превышать соответствующие значения при безоблачном небе, в силу значительного роста рассеянной радиации при отсутствии ослабления прямой ФАР.

Таблица 1

Значения ФАР ($кВт/м^2$) в зависимости от высоты Солнца, АОТ и форм облачности

h	Ясное небо			Облака (сплошной покров)					
	АОТ=0.1	АОТ=0.2	АОТ=0.5	Сi	Sc	St	Сb	туман	Ns
10	0,065	0,060	0,052	0,186	0,018	0,013	0,009	0,017	0,009
20	0,141	0,133	0,118	0,219	0,036	0,025	0,020	0,033	0,018
30	0,223	0,215	0,192	0,240	0,053	0,036	0,031	0,048	0,026
40	0,307	0,300	0,271	0,255	0,069	0,046	0,043		0,033
50	0,387	0,381	0,347	0,266	0,083	0,055	0,053		0,040

В весенне-летние месяцы дополуденные значения ФАР несколько больше соответствующих послеполуденных, это объясняется развитием внутримассовой облачности в послеполуденные часы в это время года (табл.2). Сплошная облачность нижнего яруса уменьшает величину ФАР более чем в три раза (табл.1).

Таблица 2

Суточный ход средних часовых сумм суммарной ФАР ($МДж/м^2$) при средних условиях облачности

Часы	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
3–4					0,00	0,02	0,01					
4–5				0,00	0,05	0,09	0,07	0,01				
5–6			0,00	0,05	0,16	0,22	0,19	0,09	0,01			
6–7		0,00	0,04	0,16	0,34	0,40	0,37	0,23	0,08	0,01		
7–8	0,00	0,02	0,15	0,32	0,53	0,59	0,56	0,40	0,19	0,05	0,00	
8–9	0,02	0,10	0,30	0,48	0,71	0,77	0,73	0,58	0,32	0,14	0,03	0,01
9–10	0,08	0,21	0,45	0,62	0,88	0,91	0,85	0,73	0,46	0,24	0,09	0,05
10–11	0,14	0,31	0,56	0,73	0,97	0,98	0,93	0,84	0,55	0,31	0,15	0,10
11–12	0,17	0,36	0,62	0,78	1,01	1,00	0,97	0,86	0,59	0,36	0,19	0,13
12–13	0,18	0,36	0,61	0,77	1,01	1,00	0,97	0,86	0,58	0,37	0,19	0,13
13–14	0,14	0,31	0,56	0,71	0,93	0,95	0,92	0,80	0,53	0,32	0,15	0,10
14–15	0,08	0,20	0,44	0,60	0,81	0,83	0,83	0,69	0,44	0,24	0,09	0,05
15–16	0,02	0,11	0,30	0,46	0,66	0,71	0,68	0,55	0,32	0,15	0,03	0,01
16–17	0,00	0,03	0,14	0,30	0,49	0,54	0,51	0,39	0,18	0,05	0,00	
17–18		0,00	0,04	0,15	0,30	0,38	0,35	0,22	0,07	0,01		
18–19			0,00	0,04	0,15	0,21	0,19	0,08	0,01			
19–20				0,00	0,04	0,08	0,07	0,01				
20–21					0,00	0,01	0,01					

Примечание: сроки наблюдений указаны по истинному солнечному времени.

Околополуденные часовые суммы вносят основной вклад в суточную сумму. Суточные суммы ФАР в течение года в среднем возрастают от 0,43 МДж/м² (декабрь) до 8,99 МДж/м² (июнь). Их экстремальные величины дают представление о пределах изменения этой величины в реальных условиях. На рисунке 1 представлены межсуточная изменчивость ФАР: средние суточные значения за каждый день года, выбранные максимальные и минимальные значения на этот день года.

Междусуточная изменчивость составляет в среднем 45–50% от средних суток ФАР в холодный и 20–30% в теплый период года. Распределение суточных сумм ФАР в разные месяцы асимметрично, что вызвано наличием пределов: с одной стороны нуля, с другой «возможные» значения ФАР. Коэффициент вариации V% суточных сумм ФАР изменяется от 33% в июне-июле до 65% в ноябре, что определяется изменчивостью облачного покрова.

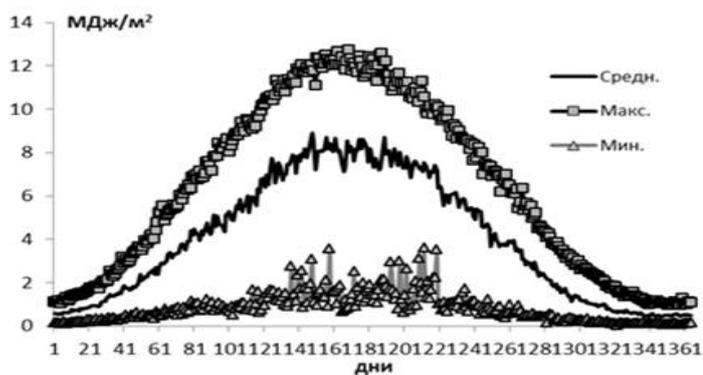


Рис.1. Средние, максимальные и минимальные суточные суммы ФАР

Наибольший практический интерес имеют пентадные и декадные суммы ФАР, так как они дают возможность получить более детальную информацию о распределении радиации в течение месяца и, следовательно, вегетационного периода (ВП). В среднем наибольшее значение ФАР (98 МДж/м^2) наблюдается в третьей декаде мая, после этого прослеживается так называемое летнее плато: с первой декады июня до последней декады июля приход ФАР меняется незначительно (на 2%) и составляет в среднем $87\text{--}89 \text{ МДж/м}^2$ за декаду. После третьей декады июля наблюдается резкое (на 20%) падение декадной суммы ФАР (рис. 2). Изменчивость декадных сумм в 2–3 раза меньше, чем суточных, и составляет около 15–20%. В среднем для периода наблюдений в МО МГУ (с 1954 года) продолжительность ВП в Москве составляет 190 дней (с 8.04 по 14.10), а для периода 1961–1990 продолжительность меньше 183 дней (с 16.04 по 15.10). За весь срок метеорологических наблюдений МГУ прослеживается тенденция увеличения длины вегетационного периода и смещение его начала на более ранние даты апреля [4].

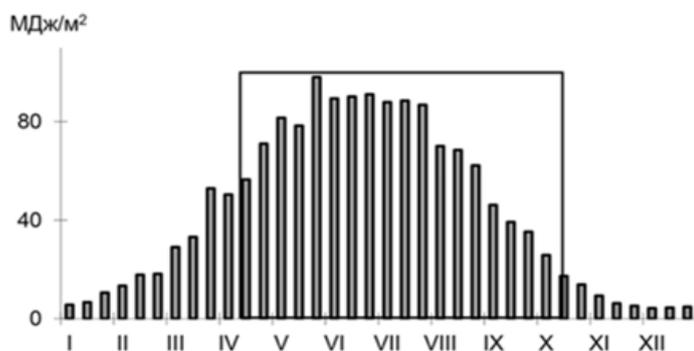


Рис. 2. Годовой ход декадных сумм ФАР
Квадратом выделен вегетационный период

В соответствии с изменением высоты Солнца, продолжительности солнечного сияния и облачности в годовом ходе максимальное поступление

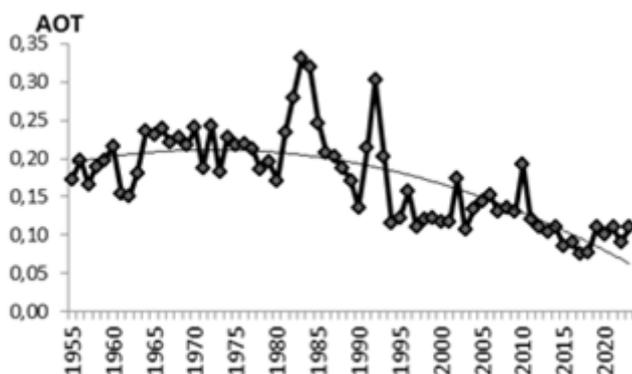
ФАР наблюдается в июне (257 МДж/м²), а минимальное – в декабре (13 МДж/м²), разница между минимальными и максимальными месячными значениями в 1,5–2 раза (табл.3). В отдельные годы, в зависимости от условий облачности, максимум может наблюдаться в июле, минимум в ноябре. Распределение месячных сумм ФАР близко к нормальному, их изменчивость меньше, чем суточных сумм ФАР. В течение года доля ФАР в интегральном потоке изменяется незначительно: от 39% зимой до 44% в летнее время.

Таблица 3

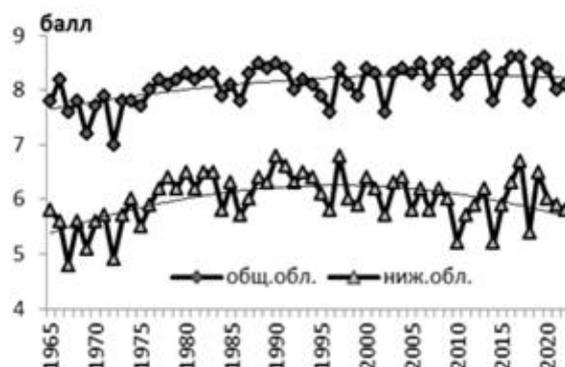
Месячные и годовые суммы ФАР (МДж/м²); доля ФАР в суммарной интегральной радиации (1999–2023 гг.)

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Сред.	22	46	107	168	240	257	251	203	120	55	20	13	1502
Макс.	49	60	134	201	303	315	327	249	150	78	30	22	1743
год	2014	2007	2018	2014	2002	1999	2014	2005	2014	2005	1999	2002	2014
Мин.	13	35	27	135	183	192	198	164	73	37	15	8	1326
год	2023	2002	2023	2022	2020	2003	2018	2008	2013	2017	2003	2019	2017
V, %	32	15	20	10	11	10	13	12	15	20	17	25	7
Q _ф /Q _и *100%	40	40	40	42	44	44	43	43	41	41	40	39	41

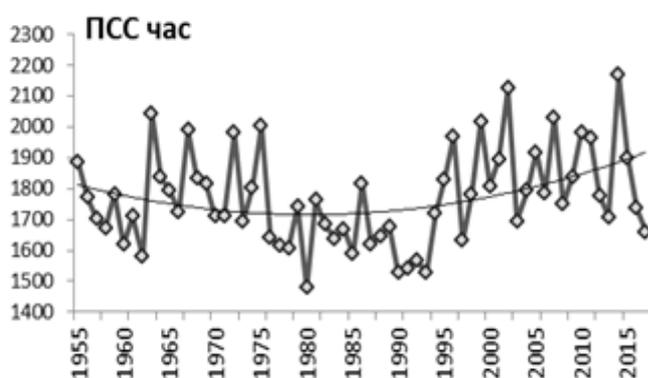
Многолетние изменения годовых значений ФАР квазициклически. Тенденция к уменьшению её поступления в середине 1980-х годов сменяется ростом в последние годы наблюдений (рис 3г.). При анализе многолетних изменений месячных значений ФАР отмечена незначимая тенденция к увеличению поступления ФАР в теплый период и незначимая отрицательная тенденция в холодный период. Для годовых сумм линейный тренд практически отсутствует. Оценка тренда в вегетационный период показала тенденцию к увеличению прихода ФАР. Для всех периодов линейный тренд статистически незначим. Тенденция изменения ФАР согласуется с изменчивостью факторов ее определяющих в большей степени с баллом облачности и продолжительностью солнечного сияния (рис.3а,б,в) [5].



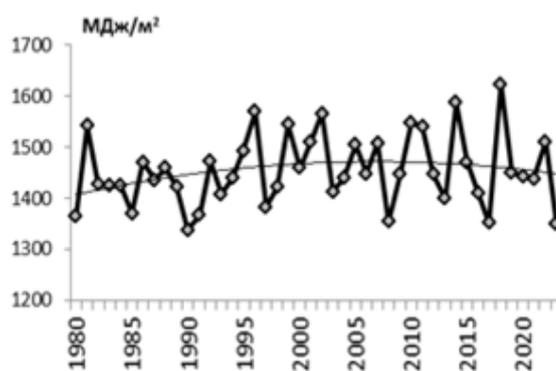
а



б



в



г

Рис. 3. Межгодовая изменчивость: а-аэрозольной оптической толщины; б-балла общей и нижней облачности; в-продолжительности солнечного сияния; г-годовых сумм ФАР

Для изучения продуктивности растительного покрова в различных регионах необходимо знать величину ФАР [6]. На сети актинометрических станций такие наблюдения отсутствуют. О. А. Шиловцевой было разработано несколько эмпирических методов расчета ФАР по данным как актинометрических, так и метеорологических измерений [7,8,9]. Принцип косвенного метода расчета ФАР по актинометрическим данным заключался в детальном изучении её вклада в суммарную интегральную радиацию. При средней за сутки облачности нижнего яруса (не более 8 баллов) следует использовать формулу: $Q_{фар} = (0.49 \cdot \sinh^{0.086}) \cdot Q_{ир}$, а при более значительной облачности – формулу: $Q_{фар} = (0.51 \cdot \sinh^{0.096}) \cdot Q_{ир}$, где $Q_{фар}$ - суммарная ФАР, $Q_{ир}$ - суммарная интегральная радиация.

При отсутствии актинометрической информации возможно использовать линейные уравнения зависимости суточной суммы ФАР от дневной продолжительности солнечного сияния, полученные на обширном материале (табл.4)

Эмпирические уравнения для определения суточных сумм ФАР по продолжительности солнечного сияния [3]

Подстилающая поверхность – снег	Подстилающая поверхность - трава
$\Sigma_c Q_{\phi} = (0,385 \cdot \sin h^2 + 1,106 \cdot \sin h - 0,091) \cdot \text{ПСС} + 6,221 \cdot (\sin h)^{1,31}$	$\Sigma_c Q_{\phi} = (0,385 \cdot \sin h^2 + 1,106 \cdot \sin h - 0,091) \cdot \text{ПСС} + 6,123 \cdot (\sin h)^{1,71}$

Заключение. На основе многолетних непрерывных актинометрических наблюдений в МО МГУ:

- получены статистически достоверные сведения о режиме ФАР с различным временным разрешением (час, сутки, месяц, год), отражающие климатические особенности ФАР Московского региона;
- проанализирована зависимость изменения величин ФАР от различных факторов;
- приведены косвенные методы расчета ФАР по данным актинометрических и метеорологических станций;
- отмечена незначимая тенденция к увеличению поступления ФАР в теплый период, что наряду с увеличением продолжительности вегетационного периода, ростом температуры и влагосодержания атмосферы, может привести к улучшению условий вегетации растений в Московском регионе.

Библиографический список

1. Махоткина Е.Л. Цветные пиранометр. //Труды ГГО. 1983. Вып. 456. С. 71-77.
2. Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В. Прозрачность атмосферы в Москве за последние 50 лет и её изменения на территории России //М.: Издательство ЛКИ. 2008.192 с.
3. Абакумова Г. М., Горбаренко Е. В., Незваль Е. И., Шиловцева О. А. Климатические ресурсы солнечной радиации Московского региона // М.: ЛИБРОКОМ. 2012. 312 с.
4. Климат Москвы в условиях глобального потепления // под ред. Кислова А.В. Издательство Московского университета Москва. 2017. ISBN 978-5-19-011227-6. 288 с.
5. Горбаренко Е. В. Экстремумы и основные тенденции в многолетней изменчивости радиационных параметров атмосферы города Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. № 6. С. 90–103.

6. Дьяконов К.Н., Шиловцева О.А. Балдина Е.А. Распределение суммарной ФАР на территории Восточно-Европейской равнины // Вестник МГУ. 2004. Сер.5. География. № 1. С.38-41.

7. Евневич Т.В., Шиловцева О.А. Метод расчета суммарной фотосинтетически активной и инфракрасной солнечной радиации по продолжительности солнечного сияния // Метеорология и гидрология. 1994. № 3, С.31-37.

8. Шиловцева О.А. Доли ФАР в интегральной солнечной радиации по расчетам и наблюдениям в Москве // Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация» (МСАР-02). СПб. 2002.С.78

9. Шиловцева О.А., Дьяконов К.Н., Балдина Е.А. Косвенные методы расчета суммарной фотосинтетически активной радиации по актинометрическим и метеорологическим наблюдениям // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С.37-47.

MONITORING OF PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION AT THE MOSCOW STATE UNIVERSITY

Gorbarenko E.V., Bunina N.A.

Moscow, Moscow State University. M.V. Lomonosov, Faculty of Geography, tel. 939-24-79, E-mail: catgor@mail.ru

Annotation. Based on long-term actinometric observations of the Meteorological Observatory of Moscow State University, statistically reliable data on PAR with different time resolutions (hour, day, month, year) were obtained, reflecting the climatic features of PAR in the Moscow region. An assessment of the factors determining the variability of PAR is given. Indirect methods for calculating PAR using data from actinometric and meteorological stations are presented. The long-term variability of monthly PAR values was analyzed. An insignificant tendency towards an increase in PAR intake in the warm period was noted. Which, along with an increase in the duration of the growing season, an increase in temperature and moisture content of the atmosphere, can lead to an improvement in the growing conditions of plants in the Moscow region.

Key words: monitoring, photosynthetically active solar radiation, radiation regime, cloudiness, growing season.