

**Е. В. Матюшевская,**  
кандидат географических наук,  
доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии БГУ;

**В. Н. Киселев,**  
доктор географических наук,  
профессор кафедры физической географии БГПУ

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ ЗА 1968–2013 гг. В БЕЛОРУССКОМ ПООЗЕРЬЕ

**В**ведение. Динамичное изменение климатических условий затрагивает прямо или косвенно все сферы хозяйственной деятельности человека и сказывается на состоянии природной среды. Основное внимание в этой проблеме уделяется анализу и прогнозу изменчивости температуры воздуха и атмосферных осадков, о чем свидетельствуют многочисленные публикации. Важнейшему климатообразующему фактору в региональном проявлении – солнечной радиации – уделяется значительно меньше внимания [1]. Региональный анализ изменчивости фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР) совершенно отсутствует, несмотря на ее неоспоримое значение для фотосинтеза, определяющего первичную продуктивность естественного растительного покрова и урожайность агрофитоценозов. Привлечение ФАР полезно для решения возникающих задач в области использования, воспроизводства и охраны биологических ресурсов в Республике Беларусь.

**Материалы и методика исследования.** Чтобы проследить многолетнюю динамику в изменчивости ФАР, необходим достаточно длинный временной ряд точных актинометрических наблюдений за приходом солнечной радиации. Таким 45-летним рядом, начиная с 1968 г., в Белорусском Поозерье располагает только метеостанция Шарковщина.

Метеостанция находится в Северной умеренно теплой, влажной агроклиматической области [2], которая в физико-географическом отношении соответствует Белорусскому Поозерью. Территории с преобладанием

сельскохозяйственных угодий окружают ее с севера, востока и юга. Западнее простирается верховое болото «Мох», примыкающее с юга к национальному парку «Браславские озера» с лесами, верховыми болотами и озерными системами. В 20 км севернее расположено крупнейшее в Поозерье верховое болото «Ельня». На верховых болотах периодически возникают пожары. Основной массив мелиорированных низинных болот расположен в 20 км южнее Шарковщины.

Крупных промышленных предприятий, которые могли бы существенно повлиять на аэрозольное состояние атмосферы над данной территорией, нет. Географическое положение метеостанции Шарковщина указывает на то, что результаты актинометрических измерений отражают динамику состояния атмосферы, мало зависящую от поступления в нее местных аэрозолей антропогенного происхождения.

Анализ погодичной изменчивости наблюдаемой прямой, рассеянной и суммарной радиации явился отправным моментом в исследовании динамики ФАР в следующие месяцы: май (начало вегетации), июнь–июль (с самым длительным суточным фотопериодом), май–сентябрь (месяцы вегетационного периода) и октябрь–апрель (безлиственный период, отличающийся от холодного включением в него апреля). Перевод интегральной радиации в ФАР сделан по понижающим коэффициентам, определенным метеостанцией Минск для Шарковщины в соответствии с ее широтным положением: для прямой 0,44 (во все месяцы кроме июля, для июля 0,43), для рассеянной 0,61 [3]. Сведения об извержении вулканов почерпнуты из ресурсов Интернета в данной области.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Приток солнечной радиации определяется не только широтным положением пункта ее определения, но и аэрозольным содержанием атмосферы, главным в котором является водяной пар [4]. Кроме него в образовании природного аэрозоля участвуют вулканические извержения, частицы биогенного происхождения, дым от пожаров, техногенное загрязнение и природные газообразные реакции. В атмосферу над Поозерьем, как и над всей Беларусью, поступают аэрозоли с воздушными потоками, формирующимися за пределами Беларуси, различного происхождения, включая испарение вод Атлантического океана, источники над Европой и вулканические извержения, и от местных лесных и болотных пожаров, а также локального техногенного загрязнения воздушной среды.

Метеостанция Шарковщина расположена на 55,40 ° с. ш., Минск – на 1,48 ° и Василевичи – на 3,12 ° южнее. Средняя температура месяцев вегетационного и безлиственного периода за анализируемый период наиболее низкая при меньшем количестве осадков по сравнению с Минском и Василевичами (таблица).

Атмосфера в высоких широтах содержит меньше водяного пара и примесей, чем в низких, и по этой причине поступление прямой солнечной радиации на этих широтах может быть больше [5]. Действительно, в среднем за вегетационные месяцы прямой ФАР, как функционально зависимой от солнечной радиации, в Шарковщине больше на 116 МДж / кв. м, чем в Минске, и на 78 МДж / кв. м по сравнению с Василевичами. Это преимущество сохраняется за безлиственный период, хотя и в меньшем различии.

**Таблица – Сравнительная метеорологическая характеристика Поозерья (Шарковщина), Центральной Беларуси (Минск) и Полесья (Василевичи) за 1968–2013 гг.**

Месяцы	Метеостанция		
	Шарковщина	Минск	Василевичи
<i>ФАР прямая, МДж / кв. м</i>			
Май – сентябрь	659	543	581
Октябрь – апрель	232	186	201
Год	891	729	781
<i>ФАР рассеянная, МДж / кв. м</i>			
Май – сентябрь	469	774	786
Октябрь – апрель	417	417	463
Год	886	1191	1249
<i>ФАР суммарная, МДж / кв. м</i>			
Май – сентябрь	1128	1317	1367
Октябрь – апрель	649	603	664
Год	1777	1920	2031
<i>Температура, t °C</i>			
Май – сентябрь	14,5	15,4	15,9
Октябрь – апрель	-0,7	0	0,5
Год	5,5	6,3	7,0
<i>Осадки, мм</i>			
Май – сентябрь	341	370	356
Октябрь – апрель	288	326	292
Год	629	696	648

Как результат в годичном итоге, прямой ФАР значительно больше в Поозерье, чем в центре и на юге Беларуси (таблица). Это непосредственное свидетельство того, что аэрозольное содержание атмосферы, включая антропогенное загрязнение, на севере Беларуси значительно меньше и воздушный бассейн является наиболее чистым, чем в более южных регионах.

Поток рассеянной радиации может увеличиваться в 8–10 раз при наличии облаков, представляющих хорошую рассеивающую среду при освещении Солнцем, чем при ясном небе. При сплошной облачности среднего и верхнего ярусов рассеянной радиации в 1,5–2 раза больше, чем при ясном небе. Только при выпадении осадков и при очень мощной сплошной облачности рассеянной радиации меньше, чем при ясном небе.

Содержание рассеянной ФАР в воздушной среде над анализируемыми регионами отличается более контрастно, чем прямой: над Шарковщиной ее меньше в 1,65 раза, чем над Минском, и 1,68 раза, чем над Василевичами. В результате возникли различия в суммарной ФАР над привлеченными для исследования территориями (таблица). Рассеянная солнечная радиация непосредственно обеспечивает энергией фотосинтез первичной продукции [6]. Таким образом, в Поозерье ее недобор по сравнению с более южными регионами выступает в роли фактора, лимитирующего урожайность сельскохозяйственных культур, не исключая влияния на нее других климатических и почвенных условий.

В полиноме (пятая степень) динамики прямой ФАР за месяцы вегетационного периода прослеживается волновой компонент, менее выраженный в начальном месяце вегетации (мае) и четко в месяцы с самым длинным суточным фотопериодом и за вегетационный период в целом (рисунок 1).

Изменение прямой ФАР в Поозерье имеет свои региональные особенности, заключающиеся в следующем. Период ее наименьшего значения (многолетняя аномалия) охватывает 1974–1990 гг. при среднем ее ежегодном параметре за месяцы вегетационного периода менее 600 МДж / кв. м (за исключением 1979 г.) при рекордно минимальном уровне в 1977 г. (401 МДж / кв. м, в том числе за июнь – июль 163 МДж / кв. м). При ограниченности наблюдений за предыдущие годы эту аномалию в 1974–1990 гг.

целесообразно сравнить с годами проявления волны в динамике ФАР (1991–2012 гг.).

Среднее ежегодное поступление прямой ФАР за июнь – июль в 1974–1990 гг. составляло 250 МДж / кв. м, или 71 %, по сравнению с годами волны (351 МДж / кв. м). За все месяцы вегетационного периода эти различия сохранились (соответственно 546 МДж / кв. м, или 74 %, и 736 МДж / кв. м). Изменения в притоке прямой солнечной радиации отразились в температурных условиях сравниваемых лет: вегетационный период до волны был менее теплым (14,1 °С) по сравнению с ее годами (14,9 °С). Это отличие в климатической обстановке можно объяснить зависимостью температуры воздуха от притока прямой солнечной радиации [1].

По увлажненности сравниваемые временные календарные отрезки отличались незначительно: в среднем за вегетационный период при аномалии выпадало 353 мм осадков, при волне 343 мм. Однако это не может привести к появлению самой волны. Следовательно, несущественным различием в многолетнем аэрозольном содержании водяных паров в атмосфере над Поозерьем невозможно объяснить поступательные изменения прямой ФАР.

Начавшаяся с середины 1970-х гг. вулканическая активизация проявилась в мощности извержений вулканов. После крупномасштабного извержения в 1963–1964 гг. Агунга в 1975–1976 гг. извергались вулканы Камчатки: Безымянный, Шевелуч, Плоский Толбачик, пик Сырачева и др., в Исландии – Эльдфетль (1973–1974 гг.), Гримсвотн, Бардарабунг (1975–1976 гг.), Гекла (2000 г.) и др. Произошли извержения вулканов Мерани (Филиппины), Семеру (Индонезия) и Августина (Аляска), в 1980–1981 гг. – наиболее масштабные Арекаля и Святой Елены, в 1983 г. – Эль-Чичона в Северной Америке, позднее, в 1991 г., Пинатубо. На аэрозольное содержание атмосферы над Беларусью наиболее вероятное влияние могли оказать самые мощные вулканические извержения Агунга, Святой Елены, Эль-Чичона и Пинатубо, а также извержения исландских вулканов при западном переносе воздушных масс.

Суммация водяного пара в воздушной среде с увеличившимся вулканическим аэрозолем в атмосфере проявилась в наиболее низких значениях поступления прямой ФАР в Поозерье. Так, ее рекордно низкое значе-

ние (401 МДж / кв. м) за месяцы вегетационного периода было в 1977 г. с 394 мм осадков (по сравнению с 212 мм осадков в 1976 г.).

Следующая по минимальной значимости ее величина (456 МДж / кв.м) пришлась на 1987 г. (409 мм осадков). Очищение атмосферы от вулканического аэрозоля привело к возникновению волны в многолетней динамике поступления прямой ФАР, гребень которой был поднят ее наибольшими значениями в 1999 г. (871 МДж / кв. м) и в 2002 г.

(927 МДж /кв. м), оказавшимися самыми засушливыми (соответственно 172 и 152 мм осадков) и, следовательно, с незначительным содержанием водяного пара в воздухе. Спад волны обязан также влажному вегетационному периоду пятилетия 2009–2013 гг. (в среднем за период 373 мм осадков).

Региональное изменение рассеянной ФАР, по всей видимости, отражает динамику содержания вулканического аэрозоля над севером Беларуси (рисунок 2).

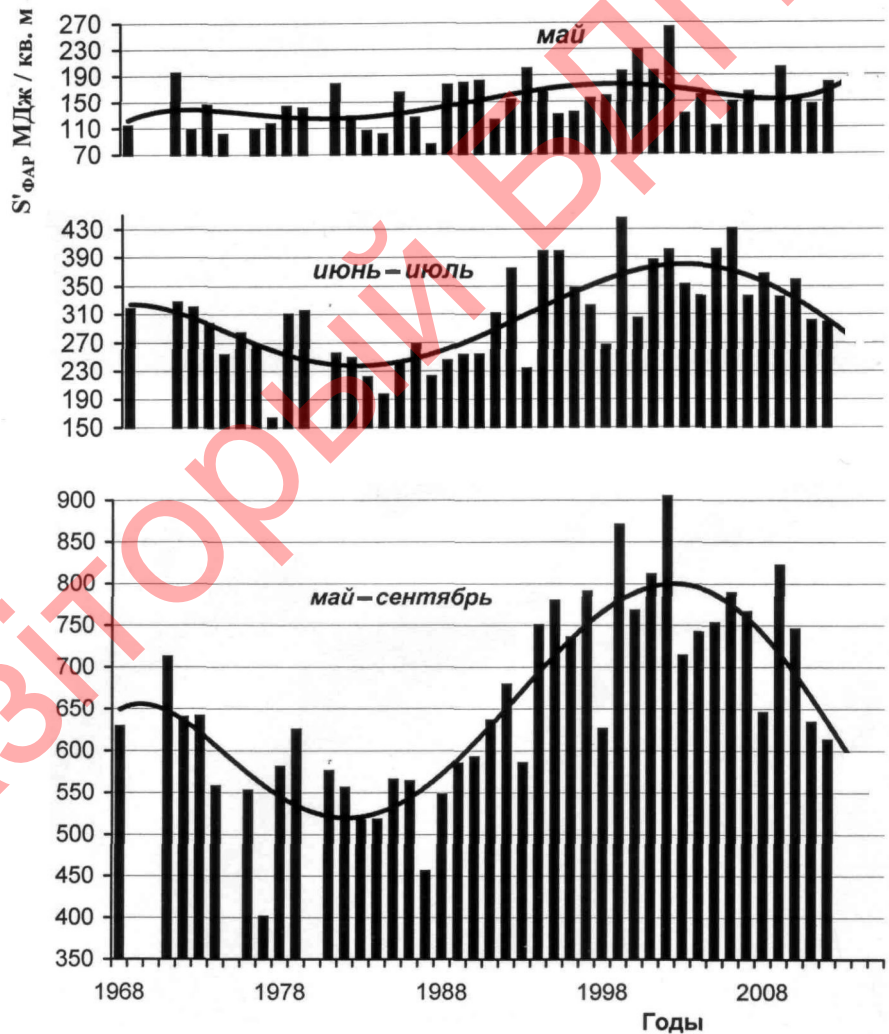


Рисунок 1 – Динамика прямой ФАР в месяцы вегетационного периода. Сплошная линия – полиномиальный тренд (пропуски в рядах – отсутствие наблюдений)



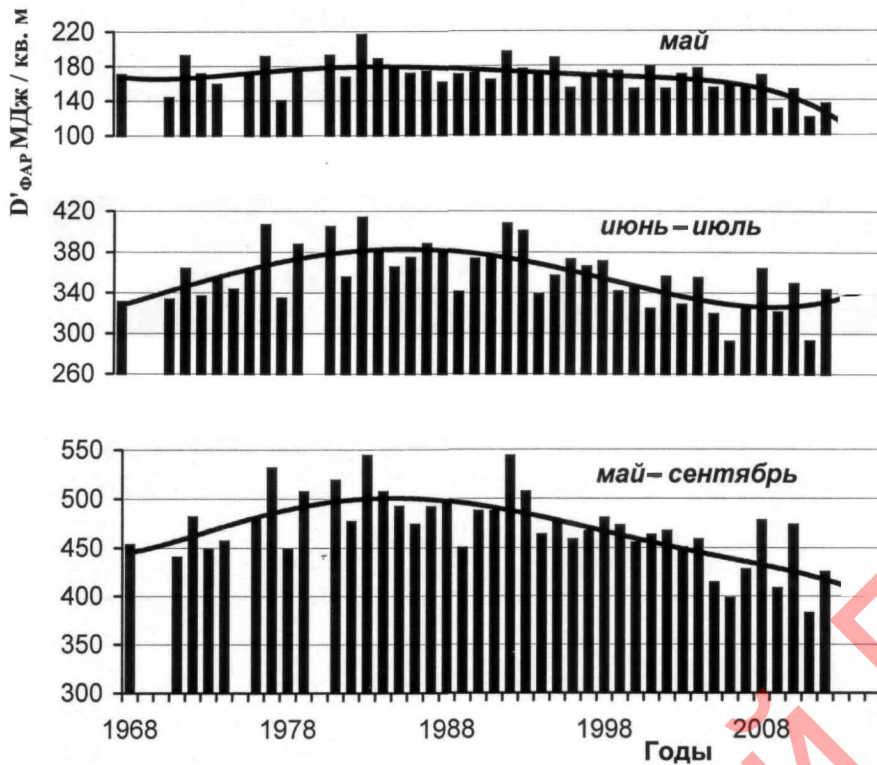


Рисунок 2 – Динамика рассеянной ФАР в месяцы вегетационного периода. Сплошная линия – полиномиальный тренд (пропуски в рядах – отсутствие наблюдений)

Ее наибольшее значение пришлось на годы вулканической активности в Северном полушарии. Следует отметить, что в 1964–1987 гг. с крупномасштабными водно-земельными мелиорациями в Белорусском Полесье ее среднегодовое количество в Поозерье, где не велось подобное преобразование природной среды, за вегетационный период (484 МДж / кв. м) было в 1,74 раза меньше, чем в южномоне (на метеостанции Василевичи 842 МДж / кв. м), указывая непосредственно на участие аэрозоля местного происхождения в состоянии воздушного бассейна.

Динамика рассеянной ФАР, заметно увеличившейся в вегетационный период 1977 г., также достоверно отражает изменения в содержании аэрозолей в атмосфере Поозерья. Максимальное замутнение атмосферы наступило в 1983 г. после извержения вулкана Эль-Чичон в 1982 г. Поступление рассеянной ФАР за вегетационный период достигло наибольших значений (414 МДж/кв. м), умень-

шаясь до извержения Пинатубо в 1991 г. За извержением этого вулкана последовало быстрое увеличение рассеянной радиации в 1992 г. до 407 МДж/кв. м и несколько меньше в 1993 г. (400 МДж / кв. м). После 1993 г. атмосфера начала очищаться от вулканического аэрозоля, что привело к постепенному уменьшению рассеянной ФАР.

Соотношение рассеянной и прямой ФАР в воздушной среде над Шарковщиной не отличалось постоянством и менялось во времени. В 1977–1993 гг. рассеянная ФАР за все месяцы вегетационного периода составляла 84 % от прямой (за июнь – июль 137 %). После 1993 г. она уже преобладала над прямой (137 %), но уступала ее значению за месяцы с самым длинным суточным фотопериодом (96 %). Ход изменчивости ФАР за месяцы безлиственного периода (рисунок 3) также имеет волновую компоненту, свидетельствующую об общей с вегетационным периодом причине ее возникновения.

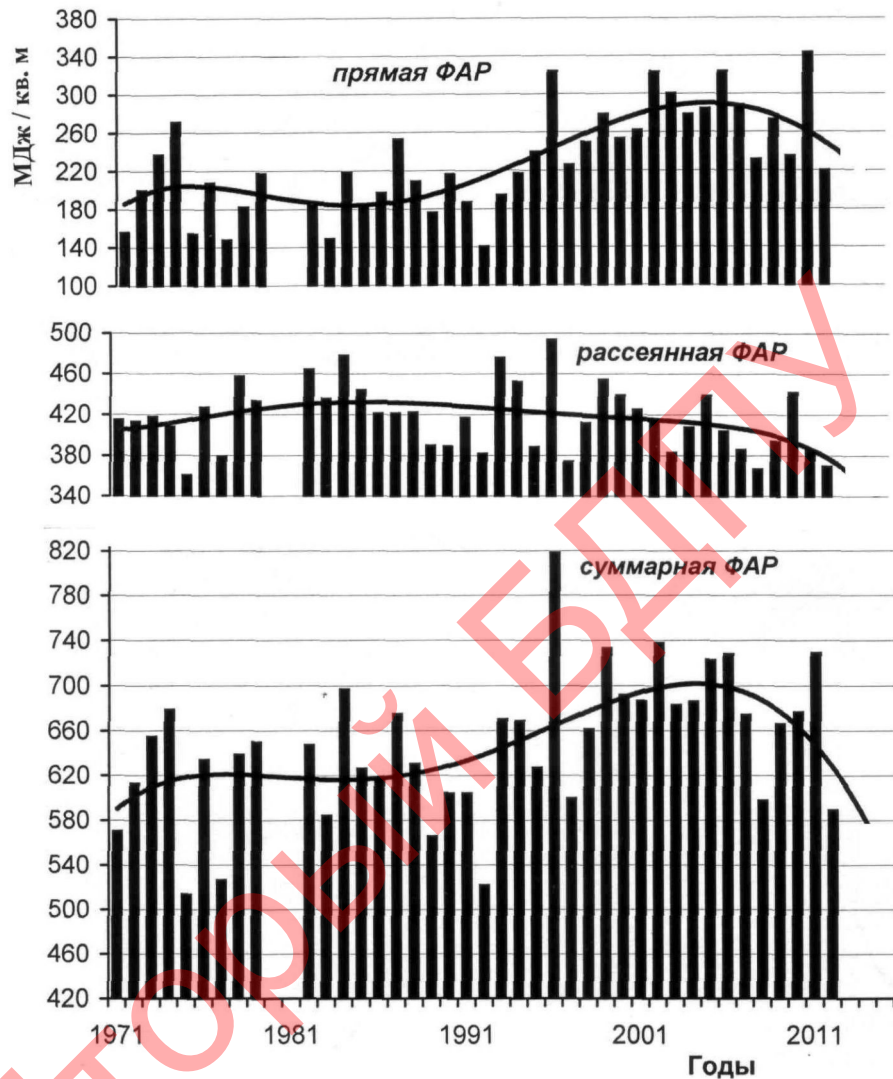


Рисунок 3 – Динамика ФАР в месяцы безлиственного периода. Сплошная линия – полиномиальный тренд (пропуски в рядах – отсутствие наблюдений)

Однако некоторые нюансы следует отметить. Возросшая значимость прямой ФАР при волне (в среднем в году 267 МДж / кв. м) по сравнению с предшествующими годами (194 МДж / кв. м) была уже при большем выпадении осадков (соответственно 305 и 280 мм). Как известно, осадки связаны с облачностью, отражающей влагосодержание воздушной среды. Следовательно, этот фактор не мог повлиять на возникновение волны. Наименьшее значение прямой и суммарной ФАР в 1992 г. следовало за извержением Пинатубо в 1991 г. Во временном ряду изменчивости суммарной ФАР особенно выделяется 1996 г. с малоувлажненным безлиственным периодом, в котором выпало только 218 мм осадков (меньше было только в 1980 г. – 177 мм, однако актинометрические данные за этот год отсутствуют). После начала 1990-х гг. безлиственный период

потеплел до 0,1 °С по сравнению с предшествующими годами (-1,1 °С).

**Заключение.** Динамика фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР) в Поозерье подчинена тем же флуктуациям, что и климата с его значимостью температурных условий в конкретные временные отрезки. Наиболее вероятной причиной изменчивости ФАР на севере Беларуси послужила динамика аэровулканического аэрозоля, на которую наложились региональные условия увлажненности, отражающие содержание водяных паров в воздушном бассейне. Привлечение ФАР дополняет представление об изменении климатической ситуации, что может быть полезно при принятии решений в области использования, воспроизводства и охраны биологических ресурсов в данном регионе Республики Беларусь.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хвойные леса Беларуси в современных климатических условиях (дендроклиматический анализ) / В. Н. Киселев [и др.]. – Минск : Право и экономика, 2010. – 202 с.
2. Шкляр, А. Е. Климатические ресурсы Белоруссии и их использование в сельском хозяйстве / А. Е. Шкляр. – Минск : Вышэйшая школа, 1973. – 430 с.
3. Материалы по радиационному режиму Белоруссии (Дополнение к Справочнику по климату СССР, вып. 7, ч. 1). – Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 1977. – 38 с.
4. Аэрозоль и климат / под ред. К. Я. Кондратьева – Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 511 с.
5. Матвеев, Л. Г. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Г. Матвеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
6. Цельникер, Ю. Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений / Ю. Л. Цельникер. – М. : Наука, 1978. – 212 с.

## SUMMARY

*The dynamics of photosynthetically active solar radiation (PAR) in Lakeland are subordinated to the same fluctuations as the climate with its significance of temperature conditions within specific time intervals. The most likely cause of the variability of PAR in the north of Belarus was the dynamics of the volcanic aerosol, which is influenced by the regional conditions of moisture which reflect water vapor content in the air basin. Use of PAR supplements the idea of climate change situation, which can be useful when making decisions on the field of use, reproduction and protection of biological resources in this region of the Republic of Belarus.*

Поступила в редакцию 01.06.2015 г.