

УДК [911.9:556.56]:551.521.1

*В.Н. Киселев, доктор географических наук,
профессор кафедры физической географии БГПУ;
Е.В. Матюшевская, кандидат географических наук,
доцент кафедры общего землеведения БГУ;
А.Е. Яротов, кандидат географических наук, старший преподаватель
кафедры физической географии материков и океанов БГУ;
П.А. Митрахович, кандидат биологических наук, доцент
кафедры физической географии материков и океанов БГУ*

СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР НА ВЕРХОВЫХ БОЛОТАХ

Введение. В дендроклиматологии основными факторами изменчивости радиального прироста определены температура воздуха и осадки, о чем свидетельствуют многочисленные публикации. Другими факторами, в частности солнечной радиации, практически не уделяется внимания, и ее участие в многолетнем ходе нарастания стволовой массы и жизненного состояния древостоя остается слабо изученным. Верховые болота игнорируются при постановке дендроклиматических исследований и при оценке состояния природной среды.

Беларусь относится к территориям с низкой чувствительностью хвойных пород (ели и сосны) к изменчивости климатических условий по причине высокого плодородия лесных почв [1]. Как представляется, наиболее чувствительными к современным изменениям климата должны быть насаждения этих пород в наиболее низких по плодородию эдафотопам, включая верховые болота.

Верховые болота оказались перспективными для дендроклиматических исследований с целью получения информации о состоянии природной среды в различных регионах Беларуси [1]. Расширение их перечня, вовлекаемого в экологический мониторинг, будет способствовать более полному пониманию современного состояния не только болотных, но и лесных ландшафтов Беларуси. В этом плане особый интерес могут представить озерно-омбротрофноболотные комплексы – соседство озер и верховых болот.

Озерно-омбротрофноболотные комплексы распространены в основном в средней полосе Беларуси и в Поозерье и являются составной частью охраняемых территорий различного ранга. Природоохранные территории должны

быть привлекательны не только для рекреационных целей и охраны растительного и животного мира, но и представлять интерес для научных исследований. Верховые болота в них являются одним из его структурных природных компонентов. Ландшафты Беларуси невозможно представить без участия этого компонента в их системной организации. Пульсирующее развитие верховых болот, омбротрофных по своей природе, на самом низком гипсометрическом уровне непосредственно связано с колебаниями первого от поверхности водоносного горизонта, которые, в свою очередь, определяются атмосферными осадками.

Гидрофильные свойства торфа и мохового покрова во многом сглаживают эти колебания, но рассматривать верховые болота как индикатор устойчивости природных условий на конкретных территориях было бы неверно. Изменчивость климата, естественно, должна отражаться в водообеспеченности верховых болот.

Водообеспеченность верховых болот отражается в состоянии и продуктивности единственной древесной породы на них – сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). В качестве индикатора этих изменений выступает годовое кольцо. Привлекать радиальный прирост сосны, угнетенной переувлажненностью эдафотопы с кислым и бедным субстратом (торфом), как показали исследования [1], целесообразно для выявления динамики природной среды как в ее естественном развитии, так и под влиянием осушительной мелиорации.

Основная задача при этом заключается в обнаружении великовозрастных деревьев, дендрохронология которых была бы как можно более продолжительной и включала бы не

менее двух-трех столетий. К сожалению, сосны такого возраста на верховых болотах Беларуси встречаются крайне редко. И их находка – большая удача.

Материалы и методика исследования.

Объектами исследования служили верховые болота в ландшафтном заказнике «Селява» на территории ГЛХУ «Крупский лесхоз» и в Поозерье: «Мох» в Дисненском лесхозе, в ландшафтном заказнике «Межозерный» и в урочище «Макомецкий лес» в Национальном парке «Браславские озера».

Исследованное верховое болото в ландшафтном заказнике «Селява» расположено в 1 км восточнее села Гузовино на берегу оз. Селява, в замкнутой котловине поперечником 0,5–0,7 км. Близость озера, естественно, оказывает взаимозависимое влияние на уровень режим болотных вод.

Тип леса – сосняк багульниково-сфагновый с редким участием голубики и клюквы мелкоплодной. Напочвенный кустарничково-моховой покров восстановлен после пожара 1972 г. Образцы древесины (керны) отобраны возрастным буровом на высоте 0,5 м в октябре 2009 г. Сведения о тестируемых деревьях приведены в таблице 1. Среди них 1 дерево оказалось в возрасте 250 лет. Его многолетний ход радиального прироста и групп сосны в возрасте 200, 135 и 115 (по определению при

измерении ширины годичных колец) лет представлен на рисунке 1.

Таблица 1 – Сведения о тестируемых деревьях

Возраст, лет	Количество деревьев	Диаметр, см	Высота, м	Коэффициент корреляции 1 порядка
250	1	30	14	0,76
200	12	18–24	10–14	0,75
135	18	20–27	9–14	0,88
115	18	18–28	8–14	0,73

У деревьев более молодого возраста (по визуальному наблюдению) образцы древесины не отбирались. Индексный прирост, определенный с применением пятилетнего скользящего сглаживания, указан на рисунке 2. Привлечены наблюдения за температурой воздуха и осадками на станции Белгидромета (Минск) с 1891 г. и за притоком солнечной радиации, начатые в 1955 г. Статистическая обработка данных проведена с использованием пакета прикладных программ SPSS.

Многолетний ход изменчивости радиального прироста сосны на верховых болотах Поозерья и его дендроклиматический анализ уже опубликован [1]. Для установления связи ширины годичных колец с солнечной радиацией использованы в пересчете на гидрологический год актинометрические наблюдения на метеостанции Шарковщина, начатые в 1970 г.

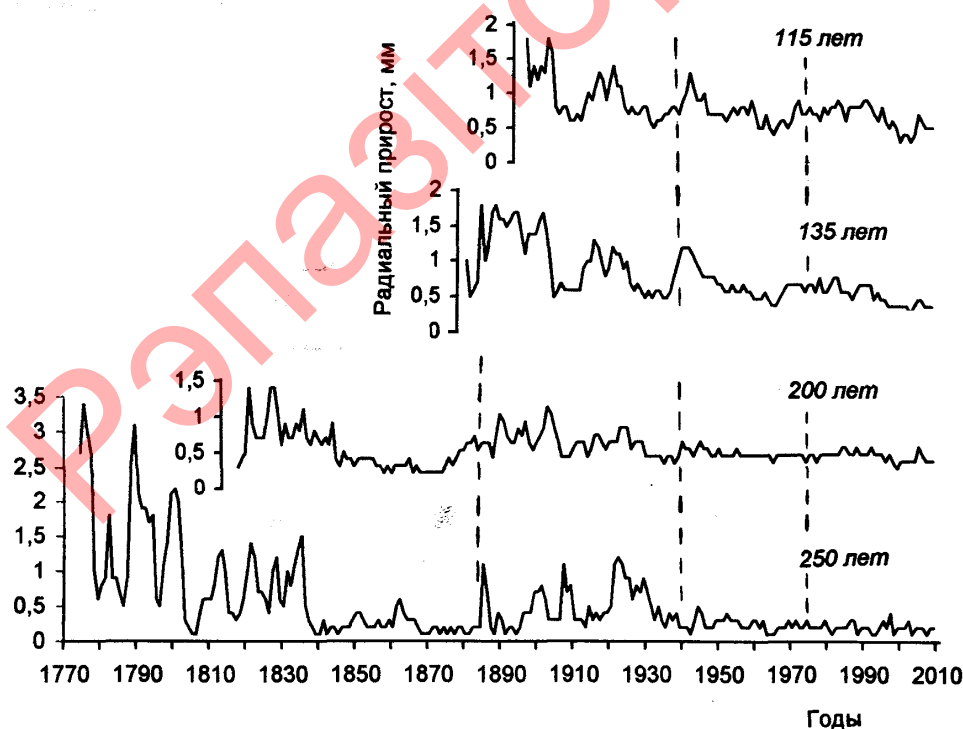


Рисунок 1 – Многолетний ход изменчивости радиального прироста возрастных групп сосны на Прошицком верховом болоте. Вертикальными штриховыми линиями показаны 1884, 1940 и 1976 гг.

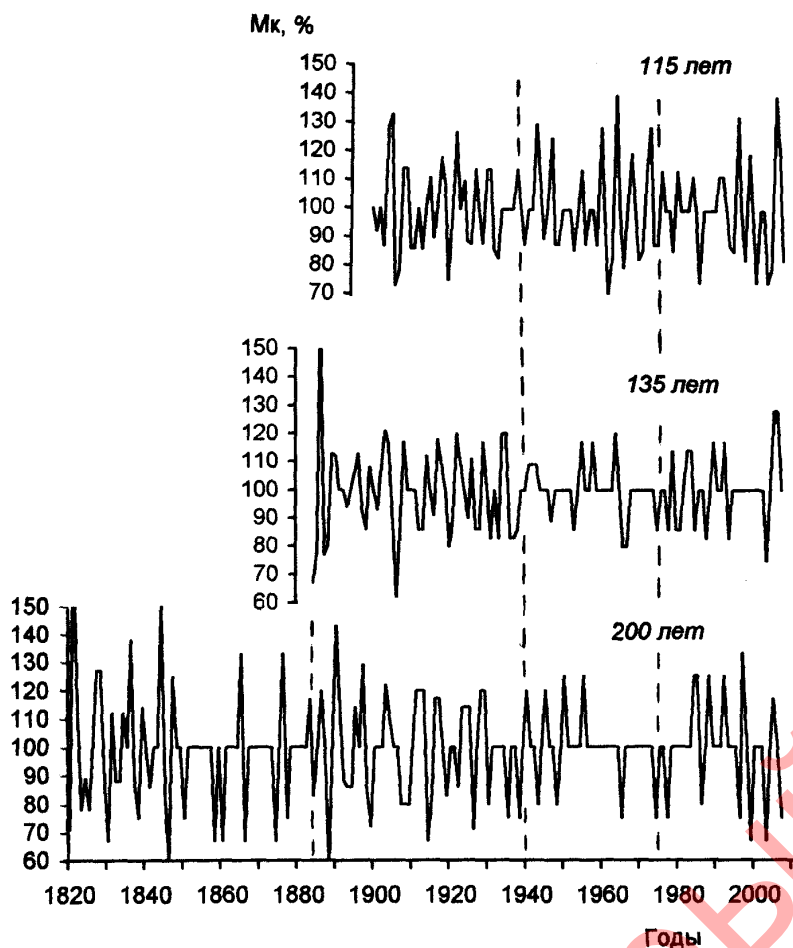


Рисунок 2 – Многолетний ход изменчивости индексного прироста возрастных групп сосны на верховом болоте

Обсуждение результатов. Дендрохронология 250-летнего дерева, являясь уникальной по продолжительности, позволяет проследить изменение стволовой продуктивности сосны и, следовательно, увлажненность верхового болота за достаточно длительный временной период, начиная с 1750-х гг. Деревья такого преклонного возраста на других исследованных болотах в Центральной Беларуси и в Поозерье не обнаружены [1].

Максимальный радиальный прирост (3,4 мм) в начале роста мафусаила верховых болот с наибольшей погодичной изменчивостью уменьшался до минимального значения (0,5 мм) в 1802 г. Такую значительную дисперсию радиального прироста можно объяснить контрастностью погодно-климатических условий в последней четверти XVIII в.: чередованием засушливых лет, «великой зимы» 1780–1781 гг., сильнейших холодов и обильных осадков после извержения вулкана Лаки в 1783 г. [2]. В отдельные годы (1774–1777, 1789 гг.) радиальный прирост молодого древесного растения приближался к приросту на автоморфных почвах.

Во временном отрезке между 1802–1804 гг. и окончанием 1830-х гг. максимально

возможный радиальный прирост сократился до 1,3 мм, что может быть объяснено возросшей обводненностью болота при меньшей контрастности погодно-климатических условий. Наиболее значимое угнетение прироста (до 0,4 мм) наступало после крупнейшего за историческое время извержения вулкана Майон в 1914 г. и взрыва Тамборы в 1815 г.

Резкое падение радиального прироста произошло в начале 1830-х гг. Угнетение 200-летней группы деревьев наступило несколько позднее, в начале 1840-х гг., после которых ухудшение лесорастительных условий для сосны на верховом болоте продолжались до середины 1880-х гг.

По причине необнаружения великовозрастных (200 лет и более) деревьев в Центральной Беларуси и в Поозерье радиальный прирост 200-летней группы сосен приходится сравнивать с такой же возрастной группой деревьев на валу «болотного городка», находящемся в Припятском Полесье [3]. У этой возрастной группе деревьев наиболее активное нарастание стволовой массы также закончилось к 1840 г., после которого также наступило угнетение радиального прироста до середины 1880-х гг.

Как оказалось, в изменчивости радиально-го прироста сосны на исследованном верховом болоте и на насыпном валу «болотного городка» с совершенно несхожими эдафотопами, кроме бедности субстрата, просматривается общая закономерность, свидетельствующая об ухудшении климатической ситуации в Беларуси в 1840–1880 гг. при окончании малой ледниковой эпохи. По всей видимости, это ухудшение укладывается в максимальное похолодание 1857–1891 гг. на Русской равнине в холодный период 1573–1891 гг. [4].

Чувствительность сосны на исследованном верховом болоте к изменчивости климатических факторов (по А.Е. Дугласу [5]) и отклонения индексного прироста были наибольшими до 1840 г. (таблица 2).

После 1884 г. радиальный прирост активизировался до 1903 г., что особенно заметно у 135-летнего поколения сосен. По наблюдениям на метеостанции Минск среднегодовое количество осадков в этот период составило 676 мм. За их обильным выпадением (910 мм в 1903 г.) последовало угнетение сосен в 1903–1912 гг. (в среднем за год 758 мм).

По всей видимости, следующая волна в радиальном приросте до 1925 г. связана с некоторым улучшением условий роста насажде-

ния на болоте (отсутствие метеонаблюдений в это время не позволяет сделать более аргументированный вывод).

Увеличение обводненности болота в 1923–1940 гг. с увеличением осадков до 738 мм в среднем за год (978 мм в 1927 г., 923 мм в 1933 г.) привело к продолжительной депрессии радиального прироста вплоть до его кратковременного «всплеска» после засушливых 1937 г. (588 мм осадков) и 1938 г. (609 мм осадков) накануне неустойчиво влажной климатической эпохи.

Несмотря на чувствительность сосны к климатическим факторам ($0,32 < Kч < 0,35$) во влажную эпоху, статистически значимой корреляции индексного прироста с метеофакторами за 1882–1940 гг. не обнаружено (таблица 3). При неустойчивом увлажнении после 1940 г. 250-летняя сосна и 200-летняя возрастная группа деревьев находились в постоянном угнетении. У 135- и 115-летних поколений после 1960 г. возникла слабо выраженная волна радиального прироста, завершившаяся к началу XXI в. По времени она частично совпадает с потеплением климата после 1976 г. Подобное увеличение ширины годичных колец отмечено у сосны на верховых болотах в Полесье и в Поозерье [1].

Таблица 2 – Чувствительность к климатическим факторам и стандартное отклонение индексного прироста сосны

Возраст, лет	Коэффициент чувствительности					Стандартное отклонение				
	Годы									
	1818–1840	1841–1884	1885–1940	1941–1976	после 1976	1818–1840	1841–1884	1885–1940	1941–1976	после 1976
200	0,59	0,36	0,35	0,19	0,29	25,7	16,3	17,3	10,3	16,7
135	–	–	0,32	0,15	0,22	–	–	20,8	18,4	22,0
115	–	–	0,35	0,29	0,30	–	–	20,7	22,9	23,5

Таблица 3 – Коэффициенты корреляции индексного прироста возрастных групп сосны на Прошицком верховом болоте с метеофакторами (n равно числу лет во временном отрезке)

Возраст, лет	Период	Коэффициент корреляции $r = 0, \dots$					
		1882–1940 гг.		1941–1976 гг.		1977–2006 гг.	
		t °C	осадки	t °C	осадки	t °C	осадки
200	Безлист.	07	-03	-02	-17	16	-14
	Май-июнь	-03	28	05	-31	-19	34
	Веget.	07	12	-03	-03	00	03
	Год	-03	09	-01	03	14	-07
135	Безлист.	-05	-33	-32	-12	28	02
	Май-июнь	-21	21	17	-22	-09	21
	Веget.	-26	17	24	-08	33	11
	Год	-20	-02	-28	-18	35	10
115	Безлист.	02	-20	-25	-07	21	08
	Май-июнь	-15	00	34	-29	25	16
	Веget.	-16	03	52	-34	27	08
	Год	-13	-08	00	-41	28	12

Примечание к таблицам 3–7: Полу жирным начертанием выделены значения коэффициента корреляции при $P = 0,95$, полу жирным начертанием и курсивом – при $P = 0,99$. Безлист. – безлиственный период, вегет. – вегетационный период.

Индексный прирост статистически значимо не коррелировал с температурой воздуха и осадками как при похолодании (до 1976 г.), так и при потеплении (после 1976 г.) климата (таблица 3). Отсутствие этой корреляции сохранялось и на следующий год (по этой причине данные анализа не приведены).

Привлечение фактического (в мм) радиального прироста для установления его связи с метеофакторами показало, что только при похолодании в 1941–1976 гг. возникала его статистически значимая отрицательная корреляция с температурой воздуха в текущем и в следующем годах (таблица 4) при низкой чувствительности к этим факторам (таблица 2).

Природное своеобразие верхового болота должно сказаться на его реакции на изменчивость поступления солнечной радиации. Фактический радиальный прирост 200- и 135-летнего поколения сосен положительно коррелировал с рассеянной радиацией (таблица 5). Эта зависимость сохранялась и на следующий год. У 115-летней группы такая связь отсутствовала. С прямой солнечной радиацией

такой корреляции в текущем году у фактического прироста не обнаружено. Но на второй год после текущего (лаг 2 года) у 135- и 115-летних поколений возникала обратная зависимость от прямой солнечной радиации с высоким уровнем значимости (до 0,999 при $n = 52$). В целом за год эта обратная связь между приростом и солнечной радиацией сохранялась, но при меньшем уровне значимости ($P = 0,95$ для месяцев активного роста мая и июня и $P = 0,99$ за вегетационный период).

Как известно, прямая радиация определяет тепловой режим, скорость протекания физиологических процессов и регулирует обмен воздуха в насаждениях, но при высоком значении при безоблачном небе может прекратить фотосинтез. В ясную погоду спектр рассеянной радиации смещен в сторону коротких волн и наиболее богат фотосинтетически активной составляющей. Хотя перегрев хвои в жаркое время для сосны не очень опасен [6], вероятность его в верховом болоте велика по причине микроклиматических особенностей этого экотопа (ослабленный ветровой режим и др.).

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции фактического (в мм) радиального прироста возрастных групп сосны на Прошицком верховом болоте с метеофакторами (n равно числу лет во временном отрезке)

Возраст, лет	Период	Коэффициент корреляции $r = 0, \dots$					
		1882–1940 гг.		1941–1976 гг.		1977–2006 гг.	
		t °C	осадки	t °C	осадки	t °C	осадки
200	Безлист.	-06	-10	-25	-24	-10	-38
	Май–июнь	-29	11	-26	-21	-15	21
	Вегет.	-07	03	-13	20	-12	19
	Год	-10	-02	-26	00	-13	-12
135	Безлист.	02	-27	-36	-35	-01	-20
	Май–июнь	-24	-13	-36	10	-15	09
	Вегет.	03	-15	-22	05	-23	15
	Год	04	-28	-38	-22	-10	-02
115	Безлист.	11	-20	-30	-16	-02	-15
	Май–июнь	-22	-07	-20	-18	11	12
	Вегет.	06	-15	-15	-01	-14	12
	Год	07	-25	-26	-23	-08	-01

Таблица 5 – Коэффициенты корреляции радиального (в мм) прироста сосны на Прошицком верховом болоте с солнечной радиацией после 1955 г. в текущем ($r = 0, \dots$) и в следующие годы (лаг 1, лаг 2, $r = 0, \dots$) ($n = 52$)

Возраст, лет	Период	Солнечная радиация					
		прямая		рассеянная		суммарная	
		r	лаг 2, r	r	лаг 1, r	r	лаг 2, r
200	Май–июнь	-20	-19	28	32	-08	-12
	Вегет.	-14	-25	33	18	02	18
	год	-21	-23	44	27	06	-13
115	Май–июнь	-23	-46	28	31	-12	-33
	Вегет.	-22	-53	29	30	-09	-40
	Год	-36	-56	29	30	-14	-39
75	Май–июнь	-18	-41	25	24	-06	-32
	Вегет.	-21	-50	15	21	-14	-40
	Год	-26	-52	14	20	-16	-42

Таблица 6 – Коэффициенты корреляции радиального (в мм) прироста сосны с солнечной радиацией после 1970 г. на верховых болотах Поозерья в текущем ($r = 0,...$) и в следующем году (лаг 1, $r = 0,...$) ($n = 28$)

Болото	Возраст, лет	Период	Солнечная радиация					
			прямая		рассеянная		суммарная	
			r	лаг 1, r	r	лаг 1, r	r	лаг 1, r
Мох	200	Май-июнь	05	28	-18	-04	-01	28
		Вегет.	31	26	-21	-13	29	32
		Год	35	29	-29	14	31	35
	170	Май-июнь	-40	-12	-07	03	-43	-14
		Вегет.	-22	-15	-09	21	-29	-11
		Год	-14	-07	-04	07	-18	-01
	90	Май-июнь	-66	-37	19	-06	-67	-39
		Вегет.	-53	-46	09	18	-58	-46
		Год	-54	-36	-12	24	-58	-36
Межозерное	100	Май-июнь	-64	-49	01	16	-63	-48
		Вегет.	-67	-58	22	34	-69	-55
		Год	-67	-35	21	34	-47	-41
Макомецкое	90	Май-июнь	-31	-10	16	15	-33	-05
		Вегет.	-37	-29	03	39	-37	-22
		Год	-43	-34	07	25	-54	-13

Одной из возможностей для сопротивления подавлению фотосинтеза является улучшение условий охлаждения листа (хвои) за счет повышения эвапотранспирации [7]. Возрастающую потребность в воде слаборазвитая корневая система сосны не в состоянии удовлетворить из-за физиологической сухости (низкая температура болотных вод и гигрофильность субстрата и мохового покрова) и высокой влажности воздуха.

Подтверждением угнетения фактического радиального прироста и, следовательно, метаболизма сосны на верховом болоте прямой солнечной радиацией служат результаты кросскорреляционного анализа его связи с этим фактором на верховых болотах Поозерья: «Мох» в Дисненском лесхозе, в ландшафтном заказнике «Межозерный» и в урочище «Макомецкий лес» в Национальном парке «Браславские озера».

Кроме 200-летнего поколения сосен с явным угнетением, фактический прирост отрицательно коррелировал с высоким уровнем значимости с прямой солнечной радиацией в месяцы активного роста (май и июнь) и вегетационного периода (май–сентябрь) текущего года (таблица 6). Следовательно, прямая радиация оказывала лимитирующее воздействие на стволовую продуктивность сосны без запаздывания, как на Прошицком болоте. Причем это воздействие было более значимым. По всей видимости, столь негативная реакция древесного растения на прямую солнечную радиацию подавляет его положительную связь с рассеянной радиацией. В целом, в этой же реакции сосны на суммарную радиацию отразилась отрицательная зависимость ее радиального прироста от прямой.

Причина усиления негативного воздействия прямой радиации на радиальный прирост сосны на верховых болотах Поозерья по сравнению со средней полосой Беларуси заключена в региональных особенностях поступления и преобразования солнечной энергии в атмосферу над Беларусью.

Несмотря на более северное широтное (на 2°) положение Шарковщины, приток прямой радиации оказался значительно больше, чем в Минске: за месяцы активного роста на 117 и за весь вегетационный период на 247 МДж/кв. м, при практически одинаковом значении рассеянной (таблица 7). Только в Поозерье прямая радиация преобладала над рассеянной (за май и июнь на 117, за вегетационный период на 212 МДж/кв. м). Такого преобладания в Минске не было: их значения примерно равны между собой.

Таблица 7 – Сравнительное средне-многолетнее содержание солнечной радиации в Шарковщине и в Минске (по наблюдениям Белгидромета)

Период	Солнечная радиация (МДж/кв.м)		
	прямая	рассеянная	суммарная
Шарковщина			
Май-июнь	695	578	1273
Вегет.	1491	1279	2770
Безлиств.	524	693	1127
Год	2015	1972	3897
Минск			
Май-июнь	578	576	1154
Вегет.	1244	1277	2521
Безлиств.	457	693	1120
Год	1671	1970	3641

Вывод. Сосна на верховом болоте растет на пределе своих физиологических возможностей в экстремальных экологических условиях. Одним из таких условий является прямая солнечная радиация. Отрицательная зависимость радиального прироста от прямой солнечной радиации с запаздыванием на два года – не что иное, как замедленная реакция на дополнительный слабоизученный лимитирующий фактор. При снятии лимитирующих факторов радиальный прирост сосны на верховом болоте может приближаться к его значениям на автоморфных песчаных почвах (как, например, в конце XVIII в.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хвойные леса Беларуси в современных климатических условиях (дендроклиматический анализ) / В.Н. Киселев, Е.В. Матюшевская, А.Е. Яротов и др. – Минск: Право и экономика, 2010. – 202 с.
2. Борисенков, Е.П. Тысячелетняя летопись необычных явлений природы / Е.П. Борисенков, В.М. Пасецкий – М.: Мысль, 1988. – 522 с.
3. Киселев, В.Н. «Болотный городок» как объект дендроклиматических исследований / В.Н. Киселев, Е.В. Матюшевская, А.Е. Яротов и др. // Весті БДПУ. Серія 3. – 2011 – № 1.
4. Тюрин, А.М. Датирование Малого Ледникового периода по естественно-научным данным. – Режим доступа: http://new.chronologia.org/volume5/tur_mlp.html – Дата доступа 29.03.2011 г.
5. Douglass, A.E. Climatic cycles and tree growth / A.E. Douglass. – Wash. Publ., 1936. – Vol. 3. – 289 p.
6. Вилшанский, А. Физиологические основы световыносливости растений. – Режим доступа: http://www.electron2000.com/vilshansky_0003.html. – Дата доступа: 23.03.2011.
7. Цельникер, Ю.Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений / Ю.Л. Цельникер. – М.: Наука, 1978. – 212 с.

SUMMARY

Solar radiation is parsed as an ecological factor on bogs. We have investigated the connection radial increment of pine in the bogs located in reserves of Belarus to climatic factors and solar radiation. It is revealed, that the radial increment of pine negative relatively correlated with the direct solar radiation on unstable connection with temperature and precipitation.

Поступила в редакцию 17.01.2012.