

УДК 626.8

ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ БЫСТРОРАСТУЩЕЙ ИВЫ

С.Юрчук, доктор сельскохозяйственных наук

М. Рыдаловски, ???

Институт Мелиорации и Луговодства, Фаленты, Польша

Ключевые слова: урожай, уровень грунтовых вод, водные ресурсы, электрическая и тепловая энергия

Введение

В последние годы в Польше наблюдается повышенный интерес к возделыванию энергетических растений. В 2010 г. доля энергии, получаемой из обновляемых источников, в энергетическом балансе должна составлять 7,5%, а в 2020 – 14% [Strategia..., 2001]. В соответствии с осуществляемой Польшей политикой (2005) использование биомассы в производстве электрической и тепловой энергии является основным направлением развития источников возобновляемой энергии. При этом принимается, что нужную для этой цели биомассу в значительной степени обеспечит возделывание энергетических культур, а в особенности энергетической ивы. Ещё несколько лет тому назад ее возделывали на площади около 100 га, в настоящее время она превышает 10 тыс. га. Популярность возделывания ивы обусловлена величиной её годового прироста, высоким энергетическим качеством и длительностью жизни плантаций.

Решающим фактором, обуславливающим развитие энергетических культур, является обеспечение необходимого количества воды. Вода в природной среде выполняет функции средства производства биомассы и обеспечения экологического равновесия. В условиях Польши очень важным является определение водоиспользования этих культур. Изменения климата Польши, выраженные экстремальными метеорологическими явлениями – длительными засухами и излишними осадками, во многих регионах страны могут всё больше ограничивать качество и планируемое количество биомассы. Таким образом существенным является изучение влияния плантаций на водные ресурсы почв. Многолетние растения, возделываемые на сельхозугодьях для энергетических целей, могут отличаться по водными требованиям от сельскохозяйственных культур, и их значительное водопотребление может неблагоприятно отражаться на водном режиме окружающей территории и нарушать водное равновесие среды.

Водопотребность энергетических растений в Польше изучена недостаточно. В литературе относительно водных и почвенных требований имеются только общие сведения, в том числе о большом количестве воды, необходимой для выращивания энергетических

ческих растений [Faber и др, 2007; Faber, 2008; Rośliny energetyczne, 2003].

Нами в 2008 г. проведены лизиметрические исследования прутьевидной ивы *Salix viminalis* L с целью изучения ее влияния на формирование водных условий в почве, потребности воды и оценки влияния её возделывания на водные ресурсы Польши.

Методика исследований

Лизиметры расположены на опытном поле Института Мелиорации и Луговодства в Фалентах. Для возделывания прутьевидной ивы (*Salix viminalis* L.) разновидности Турбо подготовили девять больших лизиметров, изготовленных из синтетических труб, оснащенных герметическим дном и устройством для регулирования уровня воды (трубка и сосуд в дне цилиндра). Лизиметры были помещены в траншеи на глубине до 2,0 м, заполнены почвой в соответствии с естественным строением профиля и траншеи засыпаны (рис.1). Все лизиметры имеют диаметр 0,5 м и расположены на глубине: 0,7, 1,3 и 2,0 м.

Весной в лизиметры посажена прутьевидная ива, по одному растению в каждом лизиметре. Вокруг лизиметров тоже посажены ветки ивы с целью создания сомкнутой нивы. В лизиметрах и на участках применялись идентичные дозы удобрений. В опыте приняты три варианта глубины уровня грунтовой воды: 30, 100 и 170 см, каждый вариант в трёх повторностях.

В лизиметрах проведены следующие измерения: уровня грунтовой воды, влажности почвы, высоты растений и прироста биомассы, а также велись наблюдения за состоянием саженцев (поражение болезнями, вредителями). Лизиметры оснащены сенсорами для измерения влажности почвы. Их количество зависит от удерживаемого уровня воды: для уровня 30 см – 3 сенсора, 100 и 170 см соответственно 5 и 7 сенсоров.

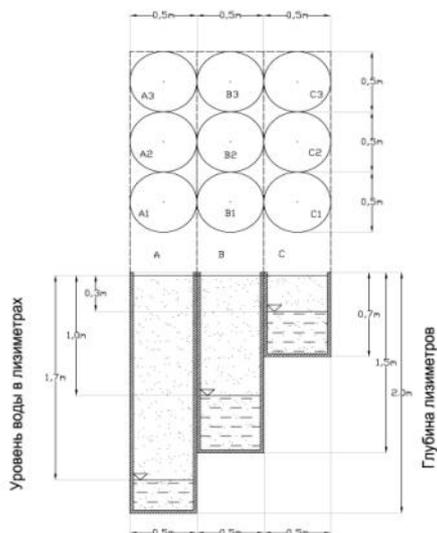


Рис. 1. Лизиметрическая станция

Ежемесячно измеряли прирост объёма растений, а в январе 2009 г. определен весовой урожай зелёной и сухой массы. Объём растений рассчитывали на основе количества побегов, их высоты и диаметра.

Ежедневно на метеостанции, расположенной рядом с лизиметрами, измеряли метеорологические параметры: температуру и влажность воздуха, температуру почвы и атмосферные осадки.

Величину урожая и использования воды рассчитали для плотности насаждений 40 тыс. кустов на гектар.

Естественные условия опыта

Фаленты расположены в мезорегионе Варшавской Равнины. Лизиметрическая станция расположена на деградированной темноцветной почве, сформированной на супеси (от 60 см), подстилаемой рыхлым песком. В верхнем слое (до глубины 40 см) преобладают мезопоры, способствующие удерживанию оптимальной пропорции воды и воздуха (табл.1). Глубже преобладают макропоры, обуславливающие преобладание почвенного воздуха и ограниченную возможность удерживания воды. Эти характеристики соответствуют параметрам легкой почвы.

Таблица 1. Физические и водные свойства почвенного профиля

Глубина, см	Объемный вес, г·см ⁻³	Сосушая сила воды (% объема) при рF:				Мезопоры 0,2-30 мкм, %	Макропоры > 30 мкм, %
		0	2,2	3,0	4,2 микропоры		
5-10	1,76	31,6	22,0	12,1	4,2	20,1	7,3
15-20	1,79	31,3	19,0	10,5	4,2	16,4	10,7
25-30	1,80	30,3	16,4	8,3	3,7	14,3	12,3
35-40	1,82	27,9	15,5	6,8	3,2	13,6	11,1
45-50	1,72	30,9	9,5	4,1	1,8	8,9	20,2
55-60	1,65	31,9	9,7	2,9	1,2	11,4	18,5
65-70	1,60	33,8	9,5	3,2	0,9	11,7	21,2
75-80	1,65	29,2	7,5	2,7	0,9	9,5	18,8
85-90	1,62	33,7	5,9	2,6	1,0	7,2	25,5
95-100	1,63	31,1	5,5	3,0	1,0	6,4	23,7

Средние многолетние осадки (1966-2008) составляли 556 мм (предельные – 419 и 772 мм), а для вегетационного периода (IV-X) – 387 мм. За год исследований и вегетационный период сумма осадков превышала средние величины. Средние месячные температуры воздуха в период вегетации и за весь 2008 г. несколько превышали многолетние (табл.2).

Результаты исследований

Для 30-сантиметровой глубины уровня грунтовой воды увлажнение зоны аэрации было стабильное и высокое и составляло от 22,7 до 26,7% объема почвы. Также для уровня 100 см увлажнение почвы было значительное (20,0-24,6 %). Но при уровне грунтовой воды 170 см увлажнение зоны аэрации понизилось до 12,5-16,2 % объема почвы (рис.2).

Исследования доказали большую зависимость урожая ивы от водных условий. Урожай сухой массы для уровня грунтовой воды 30 см составлял 16,7 т·га⁻¹, для 100 см – 21,2 и для 170 см – 12,0 т·га⁻¹ (табл.3). Оптимальный уровень грунтовой воды был немного выше 100 см. При высоком уровне воды излишнее увлажнение немного тормозило прирост растительной массы, а при уровне 170 см урожай значительно понизился за счёт истощения легко доступной воды. Увлажнение зелёной массы составляло в сред-

Таблица 2. Суммы осадков (мм) и среднее температуры воздуха (°С) для метеостанции Фаленты

Месяц	Осадки		Температура воздуха	
	2008 г.	1966-2008 гг.	2008 г.	1966-2008 гг.
I	88	29	1,2	-2,2
II	37	28	2,9	-1,1
III	56	32	3,8	2,8
IV	42	40	9,3	8,4
V	50	55	14,0	14,5
VI	24	64	18,8	17,3
VII	114	76	19,5	19,1
VIII	98	62	18,8	18,3
IX	67	49	12,7	13,5
X	17	41	10,1	8,6
XI	34	41	5,2	3,3
XII	47	39	1,5	-0,4
I-XII	674	556	9,8	8,5
IV-X	412	387	14,7	14,2

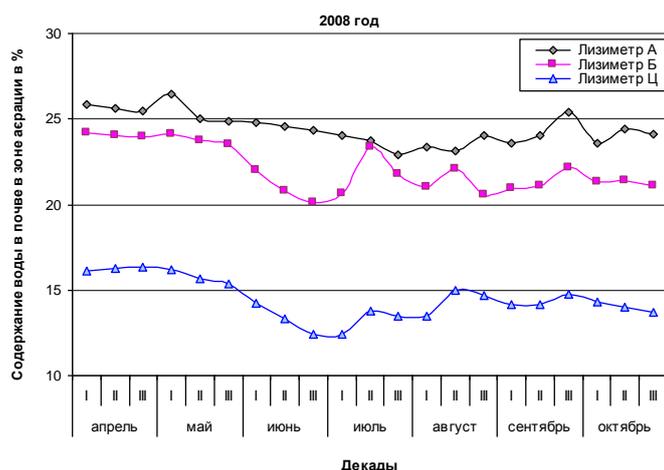


Рис.2. Среднее содержание воды в почве в зоне аэрации, выраженное в %, в лизиметрах А, В и С на лизиметрической станции в Фалентах с апреля по октябрь

Таблица 3. Урожай зелёной, воздушно-сухой и абсолютно сухой массы ивы в лизиметрах

Уровень грунтовой воды, см	Урожай зелёной массы, т·га ⁻¹	Урожай воздушно-сухой массы, т·га ⁻¹	Урожай сухой массы, т·га ⁻¹	Увлажнение зелёной массы, %
30	33,0	20,6	16,7	49,5
100	41,7	24,5	21,2	49,3
170	24,1	13,3	12,0	50,2

для различного уровня воды в лизиметрах составляло 660-887 мм (табл.4).

нем 49,7%. В лизиметрах получен высокий урожай и его следует принимать как урожай потенциальный. В полевых опытах в Польше на различных почвах получены урожаи сухой массы 5,4-21,7 т·га⁻¹, а на легких почвах – 5,4-14,6 т·га⁻¹ [Faber и др., 2007].

Для декадных периодов рассчитан водный баланс возделывания этих растений.

$$ET_r = W_p + D_r + P - W_k,$$

Для расчетов использования воды применено следующее уравнение:

где ET_r – действительное испарение в мм, W_p – количество воды в почве в начале декады в мм, W_k – количество воды в почве в конце декады в мм, P – атмосферные осадки в мм, D_r – разница между слоем прибавляемой и отбавляемой воды для поддержания постоянного уровня в мм.

Рассчитанное таким образом использование воды, учитывающее транспирацию, испарение и перехват воды, а также использование воды ивой

Таблица 4. Ежедневное использование воды прутьевидной ивой в декадах вегетационного периода 2008 г. (в мм)

Месяц	Декада	Использование воды (в мм) при уровне грунтовой воды (в см)			Индикационное испарение ET_0 , мм
		30	100	170	
IV	II	1,22	0,60	0,29	1,9
	III	1,22	0,60	0,29	3,4
V	I	2,22	1,48	2,48	3,2
	II	2,36	0,71	0,96	3,9
	III	1,92	1,29	1,31	3,7
VI	I	3,52	1,73	2,13	6,2
	II	2,87	1,89	2,10	4,9
	III	4,34	2,57	1,78	5,6
VII	I	4,63	5,13	2,68	5,0
	II	7,97	4,77	3,33	4,0
	III	9,67	9,52	5,40	4,9
VIII	I	9,83	10,47	7,80	4,5
	II	6,95	7,85	5,77	3,8
	III	8,00	8,77	5,76	3,0
IX	I	5,25	8,36	6,40	2,8
	II	3,00	3,79	2,97	1,7
	III	2,43	4,90	3,57	1,2
X	I	3,76	4,28	3,61	1,2
	II	2,89	4,42	3,09	1,0
	III	2,40	3,29	2,80	0,9
	В среднем за вегетационный период	4,35	4,35	3,24	3,34
	Сумма за вегетационный период	886,90	887,20	660,50	680,50

Для уровней грунтовой воды 30 и 100 см использование воды было идентичное: 887 мм, а для уровня воды 170 см немного ниже: 660 мм. Для сравнения: в Швеции эвапотранспирация ивы составляет 365-495 мм [Person, 1995], в Великобритании – 550-650 мм [Hall, 2003]. Исследованиями в Великобритании доказано, что энергетические травы (*Miscanthus*) транспирируют больше воды, чем традиционные зерновые злаки, но на 40-100 мм меньше по сравнению с энергетическими кустарниками. В Италии эвапотранспирация ивы *Salix alba* составила 576 мм в контрольном лизиметре и 1368 мм в лизиметре, удобренном азотом и фосфором, а тополя *Populus deltoides* соответственно 432 и 972 мм [Guidi и др., 2005]. Результаты, полученные в Польше, свидетельствуют, что величины эвапотранспирации находятся в пределах, установленных в других европейских странах, соответственно нашему географическому положению. Так же как и в других странах, эвапотранспирация ивы больше, чем у традиционных культур. Использование воды в Польше составляет: зерновые – 280-520 мм, свёкла – 540-730, картофель – 420-540 мм [Trybała, 1996]. В лизиметрах средняя многолетняя эвапотранспирация орошаемой ози-

мой пшеницы в период апрель–июль составляла 448, а неорошаемой – 396 мм. Эвапотранспирация сахарной свеклы с апреля по октябрь составляла соответственно 468 и 401 мм [Łabędzki, 2006].

Ива сильно реагировала на атмосферные условия в период с середины июля по конец августа. В этот период максимально увеличивалась её растительная масса и потребление воды достигало 10 мм в сутки. *В периоды до половины мая и по половине сентября процентный прирост использования воды был немного выше прироста урожая. Это свидетельствует о некотором соучастии в этот период испарения с поверхности почвы в эвапотранспирации. В остальной период прироста урожая и водопотребления похожи, что свидетельствует о преобладающей роли транспирации в общем испарении.*

Эвапотранспирацию в лизиметрах сравнили с индикационной ET_0 , рассчитанной для стандартного растения методом Пенмана-Монтеита [Allen и др., 1998] на основе метеорологических данных. При условии достаточного водоснабжения и удобрения растений фактическая эвапотранспирация равна произведению растительного коэффициента k_c и индикационной эвапотранспирации ET_0 . Растительный коэффициент позволяет сравнить водопотребности различных растений, находящихся в различных метеорологических условиях.

Эвапотранспирация в лизиметрах с ивой при уровнях воды 30 и 100 см была выше индикационной (табл.4). Растительный коэффициент k_c , выраженный отношением измеренной эвапотранспирации к индикационной, для всего вегетационного периода составлял 1,27. Эвапотранспирация в лизиметрах с уровнем грунтовой воды 170 см была сходна с индикационной ($k_c=0,95$). В Италии этот коэффициент составлял 1-1,5 [Guidi и др., 2005]. В первые месяцы после посадки ивы, когда прирост объёма растений был небольшой, растительный коэффициент был тоже невелик, а при уровнях воды 100 и 170 см был меньше коэффициента для других культур. В летний период произошло бурное увеличение этого коэффициента (табл. 5). Эвапотранспирация в лизиметрах с уровнями воды 30 и 100 см трех-, четырехкратно превышала эвапотранспирацию индикационную. Другие растения, культивируемые в Польше, имеют за вегетационный период эвапотранспирацию, сходную с индикационной (табл. 5).

Используя растительные коэффициенты ивы и других культур [Łabędzki, 2006], проведено сравнение эвапотранспирации прутьевидной ивы и других растений в метеорологических условиях 2008 г. (табл.6). Эвапотранспирацию из лизиметров с уровнем грунтовой воды 100 см можно сравнить с эвапотранспирацией орошаемых растений. Эвапотранспирация орошаемой ивы была на 48 % выше, чем орошаемого трехукосного луга, и на 41% выше орошаемой озимой пшеницы и сахарной свеклы. Эвапотранспирацию ивы в лизиметрах с уровнем грунтовой воды 170 см можно отнести к неорошаемой иве. Она на 22-26 % выше эвапотранспирации орошаемых полевых культур.

На основе расчетов использования воды и урожая определен показатель эффек-

Таблица 5. Растительные коэффициенты K_c прутьевидной ивы на лизиметрической станции в Фалентах на фоне многолетних коэффициентов для других культур [Łabędzki, 2006] (результаты усредненные с 3 декад)

Месяц	Веточная ива для уровня грунтовой воды (в см)			Орошаемый трехукосный луг, урожай 10 т·га ⁻¹	Озимая пшеница		Сахарная свекла	
	30	100	170		орошае-мая	неоро-шаемая	орошае-мая	неоро-шаемая
IV	0,50	0,25	0,11	0,72	0,75	0,74	0,44	0,44
V	0,60	0,33	0,46	1,05	1,35	1,19	0,51	0,45
VI	0,65	0,38	0,36	0,73	1,66	1,31	0,71	0,66
VII	1,63	1,39	0,82	1,05	1,07	0,87	1,18	0,97
VIII	2,23	2,44	1,70	0,93	-	-	1,35	1,06
IX	1,88	3,10	2,33	1,10	-	-	1,27	1,15
X	1,93	3,88	2,44	-	-	-	1,14	1,10

Таблица 6. Измеренная эвапотранспирация прутьевидной ивы на лизиметрической станции и расчётная эвапотранспирация других растений для условий 2008 г.

Месяц	Прутьевидная ива, уровень грунтовых вод (в см):			Орошаемый трехукосный луг, урожай 10 т·га ⁻¹	Озимая пшеница		Сахарная свекла	
	30	100	170		орошае-мая	не оро-шаемая	оро-шаемая	не оро-шаемая
IV	24,5	12,1	5,7	51,0	49,8	48,8	30,2	30,2
V	67,0	36,1	48,8	114,0	152,6	134,6	57,2	50,7
VI	107,3	61,9	60,1	121,3	277,1	218,8	117,4	109,4
VII	232,4	203,7	119,4	145,9	150,7	122,4	170,8	139,8
VIII	255,9	279,6	199,0	102,9	-	-	156,8	122,8
IX	106,9	170,6	129,6	62,7	-	-	72,6	66,0
X	92,9	123,2	97,8	-	-	-	25,3	24,3
Сумма	886,9	887,2	660,5	597,8	630,2	524,6	630,3	543,2

Таблица 7. Показатель эффективности использования воды WUE для вегетационного периода 2008 г.

Месяц	Прирост урожая, т·га ⁻¹			Использование воды, мм			WUE, г·кг ⁻¹		
	для уровня грунтовой воды (в см)								
	30	100	170	30	100	170	30	100	170
10 IV – 31 V	0,44	0,77	0,52	91,5	48,2	54,6	0,48	1,60	0,95
VI	3,73	5,24	2,57	107,3	61,8	60,1	3,48	8,46	4,28
VII	5,11	5,85	3,65	232,4	203,7	119,4	2,16	2,88	3,06
VIII	4,26	6,14	3,74	255,9	279,6	199,0	1,67	2,20	1,88
IX	2,13	2,70	1,09	106,9	170,6	129,6	1,99	1,58	0,84
X	0,99	0,46	0,44	92,9	123,2	97,8	1,07	0,37	0,45
10 IV - X	16,66	21,16	12,01	886,9	887,2	660,5	1,88	2,39	1,82

тивности использования воды (*water use efficiency* – WUE), выраженный соотношением урожая сухой массы к количеству использованной воды. Его величина зависит от уровня грунтовой воды: для УГВ 30 см он составляет 1,88, 100 см – 2,38 и 170 см – 1,82 г сухой массы на килограмм воды. Самой большой величины показатель WUE достиг в июне, а в последующих месяцах он уменьшался (табл.7). Этот показатель можно сравнить с

данными только нескольких стран, так как результаты варьируют по способу расчета, учитывая урожай всего растения, его надземной части, с листьями или без, транспирацию, транспирацию и эвапорацию, транспирацию, эвапорацию и перехват. Юргенсен и Шельде [Jørgensen, Schelde, 2001] для эвапотранспирации ивы без листьев, на основе данных Линдрота для растения с листьями, оценили показатель WUE как 2,2-2,9, на основе данных Мортенсена – 0,3-1,7 и собственных данных – 1,7-1,9 г·кг⁻¹. Полученные на лизиметрической станции в Фалентах величины WUE находятся в пределах, представляемых этими авторами. На основе литературы эти авторы утверждают, что растения, принадлежащие к типу фотосинтеза C₄ (например, кукуруза), имеют показатели WUE больше, чем растения типа C₃ (например, ива).

Выводы

1. Урожай ивы тесно связан с уровнями грунтовых вод. В более влажном году максимальный урожай на легкой почве достигается при уровне грунтовых вод 100 см. Следует ожидать, что в годы средние и сухие максимальный урожай можно получить при уровне грунтовых вод выше 100 см.

2. Использование воды ивой в течение вегетационного периода больше при высоком уровне грунтовых вод. При интенсивной продукции ивы использование воды больше, чем при выращивании традиционных полевых культур.

3. Показатель эффективности использования воды (WUE), отражающий соотношение урожая растительной массы к используемой воде, имеет наиболее благоприятную величину на легкой почве при глубине грунтовых вод 100 см.

4. Проведенные исследования показывают, что энергетическая ива требует большого количества воды, а её недостаток в значительной степени ограничивает её продуктивность на плантациях. Учитывая ограниченные водные ресурсы Польши, расширение в промышленном масштабе её производства может привести к увеличению дефицита воды.

Литература

1. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. Drain. Paper no. 56. Rome: FAO. – 1998. – 300 s.
2. Faber A., 2008. Przyrodnicze skutki uprawy roślin energetycznych. Studia i Raporty IUNG – PIB, Zeszyt 11, Puławy. – S. 43-53.
3. Faber A., Kuś J., Stasiak M. Rośliny energetyczne dla różnych siedlisk. Biomasa dla elektroenergetyki i ciepłownictwa – szanse i problemy. Warszawa: Wydawnictwo „Wież Jutra” Sp. z o.o. – 2007. – S. 26-32.
4. Guidi W., Bonari E., Bartolacci M. Water consumption of poplar and willow short rotation forestry used as vegetation filter: preliminary results. ICID 21 st European Regional Conference – 15-19 May 2005 – Frankfurt and Słubice – Germany and Poland. – 2005.
5. Hall R.L., 2003. Grasses for energy production hydrological guidelines. <http://www.berr.gov.uk/files/file14946.pdf>
6. Jørgensen U., Schelde K. Energy crop water and nutrient use efficiency. Danish Institute of Agricultural Sciences. – 2001. – 36 s.
7. Łabędzki L. Susze rolnicze. Zarys problematyki oraz metody monitorowania i klasyfikacji. Woda- Śr.-

- Ob. Wiej. Rozprawy naukowe i monografie nr 17. – 2006. – 107 s.
8. Person G., 1995. Willow stand evapotranspiration simulated for Swedish soils. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsit=5970421>
9. Polityka Energetyczna Polski, 2005. http://www.mg.gov.pl/NR/rdonlyres/CBBE5FE3-3F4A-44DD-AF55-2FF43943F32C/13548/polit_energ_polski_2025obw.pdf
10. Rośliny energetyczne, 2003. Pod redakcją Bogdana Kościka. Lublin: Wydaw. AR.
11. Strategia rozwoju energetyki odnawialnej, 2001. http://www.nape.pl/Portals/NAPE/docs/akty_prawne/strategie/strategie/strategia_rozwoju_odnawialnej.pdf
12. Trybała M. Gospodarka wodna w rolnictwie. Warszawa. PWRiL. – 1996. – 256 s.

Работа выполнена в пределах проекта PL 0073 «Моделирование энергетического использования биомассы» за счёт средств **Норвежского** Финансового Механизма ЕОГ и средств Министерства Науки и Высшего Образования РП.

Summary

S. Yurchuck, M. Rydalovsky **Intensity of Evapotranspiration for Rapid-Growing Willow**

Ascertained: Interconnection of willow crop to levels of ground waters. It is also proved that at igh level of ground waters willow uses more water than traditional field crops during their vegetation period. The efficiency index of water use (WUE) reflecting the ratio of plant mass yield to quantity of water used has the most favorable value in light soils at a depth of ground waters equal to 100 cm. The results of investigations show that growing willow for the purposes of energy requires large quantity of water, in what connection shortage of water considerably restricts crop -producing power of willow plantations. Taking into consideration the restricted water resources of Poland the expansion of willow production to industrial scale may result in increase of water deficiency.

Поступила 22 сентября 2009 г.