

rastenie – zhivotnoe: dis. ... kand. biol. nauk. – Novosibirsk, 2004. – 119 s.

7. Burlakova L.M., Antonova O.I., Deev N.G., Morkovkin G.G. i dr. Ekotoksikanty v sisteme «pochvy – rasteniya – zhivotnye» (na primere ot del'nykh zon Altaiskogo kraja): monografiya. – Barnaul: AGAU, 2001.

8. GOST 30692-2000. Korma, kombikorma, kombikormovoe syr'e. Atomno-absorbtsionnyi metod opredeleniya medi, svintsa, tsinka i kadmiya. – Minsk: Izd-vo standartov, 2001. – 11 s.

9. Chernykh N.A., Milashchenko N.Z., Ladonin V.F. Ekotoksikologicheskie aspekty zagryazneniya pochv tyazhelymi metallami. – M.: Agrokonsalt, 1999. – 176 s.

10. Metodicheskie ukazaniya po otsenke kachestva i pitatel'nosti kormov. – M.: TsINA O, 2002. – 76 s.

11. Alekhina N.D., Balnokin Yu.V., Gavrilenko V.F. i dr. Fiziologiya rastenii: ucheb. dlya studentov vuzov / pod red. I.P. Ermakova. – M.: Akademiya, 2005. – 640 s.

12. Il'in V.B., Syso A.I. Mikroelementy i tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Novosibirskoi oblasti. – Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2001. – 229 s.

13. Smolyakov A.V., Bokova T.I., Motovilov K.Ya. Vliyanie probioticheskogo preparata na akkumulyatsiyu tyazhelykh metallov v organizme ptitsy // Pishcha, ekologiya, kachestvo: tr. III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Krasnoobsk, 30 iyunya-01 iyulya 2003 g.). – Novosibirsk, 2003. – S. 59-62.



УДК 633.412:631.67:631.445.4(571.15)

С.В. Макарычев, Н.И. Зайкова  
S.V. Makarychev, N.I. Zaykova

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РЕЖИМЫ ЧЕРНОЗЁМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ПОД СТОЛОВОЙ СВЕКЛОЙ В ОРОШАЕМЫХ УСЛОВИЯХ

### THERMOPHYSICAL PROPERTIES AND REGIMES OF LEACHED CHERNOZEM UNDER TABLE BEET UNDER IRRIGATION

**Ключевые слова:** влажность, объемная теплоемкость, температуропроводность, теплопроводность, режим орошения.

В условиях Юго-Западной Сибири, где основной земельный фонд представлен потенциально плодородными черноземами, зачастую имеет место недостаток влагообеспеченности сельскохозяйственных культур. Поэтому для улучшения водного режима почв используется орошение на базе местных водных ресурсов. В то же время теплофизические свойства и режимы черноземов в условиях оросительных мелиораций изучены недостаточно. Теплофизические характеристики, такие как объемная теплоемкость, тепло- и температуропроводность, зависят от целого ряда почвенно-физических факторов: влажность, плотность, дисперсность. Почвенные горизонты исследованного чернозема по своему гранулометрическому составу достаточно однородны и постоянны во времени. Содержание гумуса в течение вегетации меняется незначительно, так же как и плотность. Поэтому влияние этих факторов на изменение теплофизических свойств минимально. Динамика влажности почвы под столовой свеклой в богарных условиях в большей степени зависит от метеорологических особенностей региона, тогда как при орошении определяется поливными нормами. Поэтому и величины объемной теплоемкости активного слоя (0-60 см) зависят только от режима увлажнения. В течение вегетации ее максимум отмечался на варианте с нормой полива

75-85%НВ. При такой влажности почвы имеет место снижение температуропроводности. В то же время динамизм теплопроводности оказывается аналогичным характеру изменений теплоемкости.

**Keywords:** moisture, volumetric heat capacity, temperature diffusivity, heat conductivity, irrigation regime.

In South-West Siberia where most of the land fund is represented by potentially fertile chernozems, there is frequent available moisture deficiency for crops. To improve the soil water regime, irrigation based on local water resources is used. Yet the thermophysical properties and regimes of chernozems under irrigation amelioration are still understudied. The thermophysical characteristics as volumetric heat capacity, temperature diffusivity and heat conductivity are determined by a number of soil-physical factors as moisture content, density and the degree of dispersion. The soil horizons of the chernozem studied are sufficiently uniform in terms of the particle size distribution and time-constant. Both humus content and density vary insignificantly throughout the growing season. The effect of these factors on the change of the thermophysical properties is minimal. The dynamics of soil moisture under table beet in rainfed conditions is largely dependent on the meteorological characteristics of the region, whereas under irrigation it is determined by irrigation rates. Therefore, the volumetric heat capacity values of the active layer (0-60 cm) depend on the mois-

tening regime only. During the growing season its maximum was observed in the variant with the irrigation rate of 75-85% of the minimum moisture-holding capacity. Temperature diffusivity reduction is ob-

served at such soil moisture. At the same time, heat conductivity dynamism corresponds to the pattern of heat capacity changes.

**Макарычев Сергей Владимирович**, д.б.н., проф., зав. каф. физики, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: phys\_asau@rambler.ru.  
**Зайкова Наталья Ивановна**, ст. преп., Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: phys\_asau@rambler.ru.

**Makarychev Sergey Vladimirovich**, Dr. Bio. Sci., Prof., Head, Chair of Physics, Altai State Agricultural University. E-mail: phys\_asau@rambler.ru.  
**Zaykova Natalya Ivanovna**, Asst. Prof., Altai State Agricultural University. E-mail: phys\_asau@rambler.ru.

### Введение

В условиях Юго-Западной Сибири, где основной земельный фонд представлен потенциально плодородными чернозёмами, зачастую ощущается недостаток влагообеспеченности. Поэтому для улучшения водного режима почв все шире используется орошение на базе местных водных запасов [1-3].

В то же время теплофизические свойства орошаемых почв остаются малоизученными [4-7].

Известно, что теплообороты в основном зависят от амплитуды колебания температуры поверхности почвы как одного из производных параметров континентальности климата. Кроме того, теплообмен в почве определяется не только приходом солнечной радиации, но и вертикальными градиентами, влагозапасами, а также физическими свойствами почв [8].

Теплофизические характеристики, такие как удельная и объемная теплоемкости, тепло- и температуропроводность, главным образом зависят от целого ряда почвенно-физических факторов: влажности, плотности, температуры почвы, её дисперсности и от количества органики, содержащейся в почвенных горизонтах [9].

### Результаты исследований

Почвенные горизонты исследованного чернозёма по своему гранулометрическому составу однородны. Содержание гумуса в почве изменяется в незначительных пределах. Поэтому влияние указанных факторов на теплофизические свойства чернозёма за вегетационный период минимально. Влиянием температуры почвы на её теплофизические характеристики за вегетационный период тоже можно пренебречь, так как (теплоёмкость, тепло- и температуропроводность) слабо зависят от температуры. Если температура верхнего 20-сантиметрового профиля почвы в течение суток изменяется значительно (на 25-30°C), то её среднедекадные и среднемесячные показания не дают такой разницы, находясь в пределах нескольких градусов. Поэтому влажность почвенных горизонтов остается существенным фактором, определяющим теплофизическое состояние почвы.

В таблицах 1 и 2 показано изменение тепловых свойств и влажности деятельного слоя с мая по сентябрь на вариантах: без орошения, 65-75% НВ, 75-85% НВ под столовой свёклой и в пару в 2011, 2012 гг.

Данные этих таблиц показывают, что в течение вегетации активный 60-сантиметровый слой почвы (где находится основная масса корней) на контроле под свёклой был наиболее сухим и в среднем составлял 10-15%. Только прошедшие обильные осадки в первой декаде июля 2012 г. увлажнили почвенный профиль (22,1%), причем это был максимум за два года исследований. На орошаемых участках влагосодержание было на уровне 17-22% в течение всего периода, и только в сентябре, когда поливов уже не проводили, оно опустилось до 13-15% от массы сухой почвы.

Объемная теплоёмкость является важнейшей теплофизической характеристикой, определяющей теплоаккумуляционную способность почвы, она зависит от влажности и плотности почвы.

Ниже представлены изменения объемной теплоёмкости по месяцам в активном горизонте чернозёма выщелоченного (0-60 см) под столовой свёклой при различных режимах орошения, на контроле (без орошения) и в паровом поле (рис. 1).

Данные этого рисунка показывают, что значения объемной теплоёмкости деятельного слоя подчиняются изменению влажности почвы. Так, на протяжении всего вегетационного периода максимальные значения были на варианте с большей нормой полива (75-85% НВ), например, в июне 2011 г.  $2,92 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К). В этом же месяце на контроле объемная теплоёмкость была в пределах  $2,62 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К), что на 10% ниже. На варианте с меньшей нормой полива (65-75% НВ) и значения имели ниже свои показатели – на уровне  $2,60-2,76 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К) с июня по август.

Из-за отсутствия растительного покрова паровое поле сохраняло почвенную влагу, в связи с этим и теплоаккумуляционная способность почвы была выше – около  $2,8 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К) всё лето 2011 г.

*Влажность (U), объёмная теплоёмкость (Cp), температуропроводность (a) и теплопроводность (λ) 60-сантиметрового слоя чернозёма выщелоченного под столовой свёклой и в пару (2011 г.)*

Дата	ТФС	U, %	Cp, 10 <sup>6</sup> Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	a, 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с	λ, Вт/(м·К)
Без орошения / паровое поле					
26.05.2011		12,60	2,40	0,64	1,54
		14,31	2,48	0,64	1,57
05.06.2011		16,50	2,59	0,63	1,60
		17,80	2,66	0,62	1,62
24.06.2011		18,23	2,68	0,62	1,63
		22,06	2,87	0,59	1,66
06.07.2011		15,48	2,54	0,64	1,59
		24,59	2,99	0,56	1,67
15.07.2011		12,95	2,41	0,64	1,54
		17,62	2,65	0,62	1,62
23.07.2011		10,40	2,29	0,64	1,49
		18,48	2,69	0,62	1,63
01.08.2011		9,19	2,22	0,64	1,46
		20,43	2,79	0,60	1,65
25.08.2011		10,67	2,30	0,64	1,50
		18,61	2,70	0,62	1,63
08.09.2011		10,27	2,28	0,64	1,49
		15,55	2,54	0,64	1,59
65-75% НВ					
24.06.2011		19,84	2,76	0,61	1,64
06.07.2011		18,08	2,67	0,62	1,62
15.07.2011		19,04	2,72	0,61	1,63
23.07.2011		18,03	2,67	0,62	1,62
01.08.2011		16,91	2,61	0,63	1,61
18.08.2011		15,68	2,55	0,64	1,59
25.08.2011		17,51	2,64	0,63	1,62
08.09.2011		11,50	2,34	0,64	1,51
75-85% НВ					
24.06.2011		23,93	2,96	0,56	1,66
06.07.2011		18,82	2,71	0,62	1,63
15.07.2011		20,97	2,81	0,60	1,65
23.07.2011		20,08	2,77	0,61	1,64
01.08.2011		19,64	2,75	0,61	1,64
18.08.2011		15,83	2,56	0,63	1,59
25.08.2011		21,01	2,82	0,60	1,65
08.09.2011		12,57	2,39	0,63	1,54
HCP <sub>05(Cp)</sub> = 2,14%; HCP <sub>05(a)</sub> = 0,98%; HCP <sub>05(λ)</sub> = 1,13%					

Примечание. Числитель – контроль, знаменатель – паровое поле.

В сентябре 2011 г. все показания объёмной теплоёмкости по вариантам снизились – сказались отсутствие поливов и осадков, в среднем на 15-20%.

В период вегетации 2012 г. существенных изменений не произошло, т.к. режимы орошения сохранялись те же. Но в целом значения были чуть ниже из-за жаркого засушливого лета. Только в первой декаде июля после обильных дождей значения теплоёмкости прибавились, а в сентябре почти все показания выровнялись из-за близкой по значению влажности и составили примерно  $2,5 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Изменение условий молекулярного переноса энергии в почвенной толще, обуслов-

ленное колебаниями влажности, приводит к варьированию температуропроводности чернозёма.

Снижение температуропроводности в почвенной толще при увеличении влажности (вариант 75-85% НВ) особенно четко выражено летом 2012 г., когда влажность почвы увеличивается выше границы ВРК. Это объясняется тем, что температуропроводность воды почти в сто раз меньше температуропроводности воздуха, а замещение воздуха водой в порах приводит к уменьшению температуропроводности. Это явление, кроме того, усложняется фазовыми превращениями и массопереносом влаги.

*Влажность (U), объёмная теплоёмкость (Cp), температуропроводность (a) и теплопроводность (λ) 60-сантиметрового слоя чернозёма выщелоченного под столовой свёклой и в пару (2012 г.)*

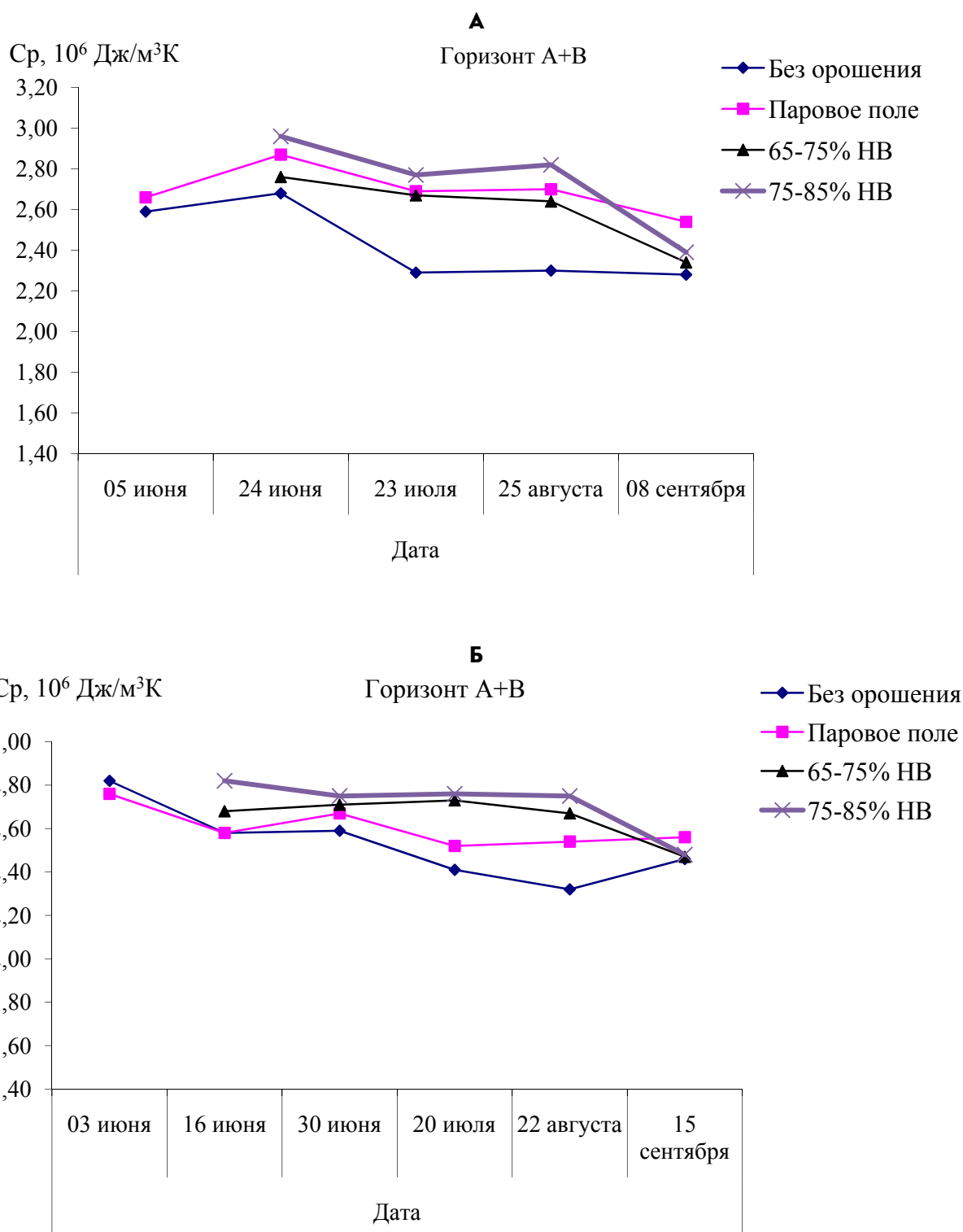
Дата	ТФС	U, %	Cp, 10 <sup>6</sup> Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	a, 10 <sup>-6</sup> м <sup>2</sup> /с	λ, Вт/(м·К)
Без орошения / паровое поле					
22.05.2012		16,92	2,61	0,63	1,61
		18,88	2,71	0,62	1,63
03.06.2012		21,01	2,82	0,60	1,65
		19,86	2,76	0,61	1,64
16.06.2012		16,23	2,58	0,63	1,60
		16,27	2,58	0,63	1,60
30.06.2012		16,51	2,59	0,63	1,60
		18,06	2,67	0,62	1,62
10.07.2012		22,14	2,87	0,59	1,66
		22,71	2,90	0,58	1,66
16.07.2012		15,84	2,56	0,63	1,60
		17,65	2,65	0,62	1,62
20.07.2012		12,86	2,41	0,64	1,54
		15,17	2,52	0,64	1,58
28.07.2012		10,94	2,31	0,64	1,50
		15,11	2,52	0,64	1,58
08.08.2012		10,72	2,35	0,64	1,52
		15,04	2,52	0,64	1,58
22.08.2012		9,11	2,32	0,64	1,51
		15,41	2,54	0,64	1,59
01.09.2012		12,85	2,32	0,64	1,51
		16,81	2,61	0,63	1,61
15.09.2012		13,84	2,46	0,64	1,56
		15,91	2,56	0,63	1,60
65-75% НВ					
16.06.2012		18,30	2,68	0,62	1,63
30.06.2012		18,97	2,71	0,62	1,63
10.07.2012		21,12	2,82	0,60	1,65
16.07.2012		16,88	2,61	0,63	1,61
20.07.2012		19,28	2,73	0,61	1,64
28.07.2012		21,17	2,82	0,60	1,65
08.08.2012		22,62	2,90	0,58	1,66
22.08.2012		18,17	2,67	0,62	1,63
01.09.2012		18,49	2,69	0,62	1,63
15.09.2012		14,03	2,47	0,64	1,57
75-85% НВ					
16.06.2012		21,00	2,82	0,60	1,65
30.06.2012		19,63	2,75	0,61	1,64
10.07.2012		21,58	2,84	0,59	1,66
16.07.2012		16,68	2,60	0,63	1,61
20.07.2012		19,90	2,76	0,61	1,64
28.07.2012		21,93	2,86	0,59	1,66
08.08.2012		23,76	2,95	0,57	1,66
22.08.2012		19,64	2,75	0,61	1,64
01.09.2012		18,53	2,69	0,62	1,63
15.09.2012		14,34	2,48	0,64	1,57
НСР <sub>05(Cp)</sub> = 1,88%; НСР <sub>05(a)</sub> = 2,19%; НСР <sub>05(λ)</sub> = 0,59%					

Примечание. Числитель – контроль, знаменатель – паровое поле.

Минимальный показатель температуропроводности мы отмечаем в августе 2012 г. –  $0,57 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, в июне 2011 г. –  $0,56$  м<sup>2</sup>/с

Максимальные значения не превышают  $0,64 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с за оба года исследований на

контроле (без орошения) под корнеплодами и в 2011 г. стабильны в течение всего вегетационного периода. Очевидно, небольшой запас влаги способствовал увеличению скорости переноса тепла.



**Рис. 1.** Изменение объёмной теплоёмкости чернозема в вегетационный период под столовой свёклой на участках с различными режимами орошения, на контроле и в пару (слой 0-60 см): А – 2011 г.; Б – 2012 г.

Изменение теплопроводности в активном слое чернозема под столовой свёклой при различных режимах орошения, на контроле (без орошения) и в паровом поле по месяцам вегетационного периода за 2011 и 2012 гг. представлено на рисунке 2. Максимальные значения теплопроводности в 2011 г. имели место на опытном участке под овощ-

ной культурой с наибольшим режимом орошения (вариант 75-85% НВ) – 1,66 Вт/(м·К). Но в сентябре значения снизились до 1,54, т.е. на 7%, когда орошение уже не влияло на теплопроводность данной почвы.

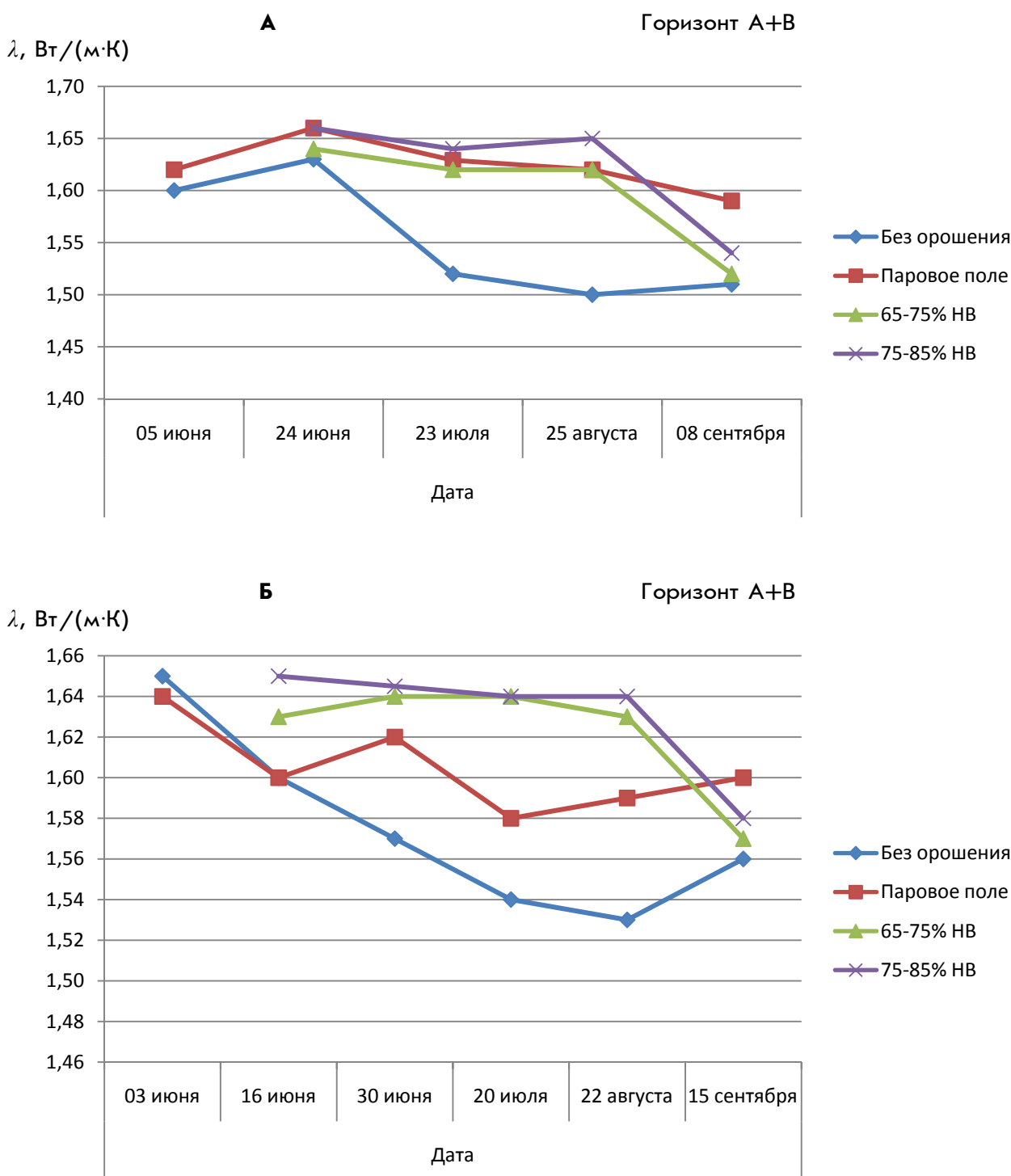
С меньшей нормой орошения (вариант 65-75% НВ) показания коэффициента снижены и

близки по своим результатам с паровым полем – 1,64-1,62 Вт/(м·К).

За вегетационный период 2011-2012 гг. по всем вариантам идет тенденция снижения показателей теплопроводности к сентябрю. Между тем минимальная теплопроводность фиксировалась на контрольном варианте и не

доходила 1,60 Вт/(м·К). В 2011 г. минимум был на отметке 1,46 Вт/(м·К) в августе, а в 2012 г. – 1,50 Вт/(м·К) в июле.

Таким образом, изменения теплопроводности в течение вегетации и по вариантам с режимами орошения были сопряжены с динамикой влажности.



**Рис. 2.** Изменение теплопроводности чернозема в вегетационный период под столовой свёклой на участках с различными режимами орошения, на контроле и в пару (слой 0-60 см): А – 2011 г.; Б – 2012 г.



**Заключение**

Исследованный чернозем имеет среднесуглинистый гранулометрический состав, хорошо структурирован, легко впитывает и удерживает влагу, что способствует созданию благоприятных условий для обеспечения растений влагой, теплом и воздухом.

Динамика влажности почвы под столовой свеклой в богарных условиях в течение периода вегетации в большей степени зависит от метеорологических особенностей региона, чем от интенсивности влагопотребления корнеплодами.

Теплофизический режим чернозема формируется под воздействием метеорологических, почвенно-физических факторов и, прежде всего, режимов орошения.

Значения объемной теплоемкости активного слоя (0-60 см) определяются динамикой режима увлажнения чернозема. На протяжении периода вегетации максимум ее отмечался на варианте с нормой полива 75-85% НВ. В то же время имело место снижение температуропроводности при таком режиме орошения. Динамизм теплопроводности за время исследований оказался аналогичным изменению теплоемкости.

**Библиографический список**

1. Заносова В.И., Зайковская Е.С. Проблемы использования природных вод для орошения // Географические проблемы Алтайского края. – Барнаул, 1991. – Ч. 1. – С. 135-136.
2. Макарычев С.В. Теплофизическое состояние почв Алтая в условиях антропогенеза. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 326 с.
3. Заносова В.И. и др. Водно-ресурсный потенциал Западно-Сибирского региона // Проблемы рационального природопользования в Алтайском крае: сб. науч. тр. – Барнаул, 2005. – С. 13-33.
4. Макарычев С.В., Мазиров М.А. Теплофизические основы мелиорации почв: учебное пособие. – М.: Химия в сельском хозяйстве, 2004. – 290 с.
5. Панфилов В.П. Агрофизическая характеристика почв Западной Сибири. – Новосибирск: Наука, 1976. – 544 с.

6. Панфилов В.П., Макарычев С.В., Лунин А.И. и др. Теплофизические свойства и режимы черноземов Приобья. – Новосибирск: Наука, 1981. – 118 с.

7. Тихонравова П.И. Особенности температурного режима и теплофизических свойств орошаемых почв солонцового комплекса Заволжья. – М., 1988. – 23 с.

8. Макарычев С.В., Гейке И.В., Шишкин А.В. Теплофизическое состояние черноземов плодовых садов Алтайского Приобья. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. – 191 с.

9. Мазиров М.А., Макарычев С.В. Теплофизика почв: методы и свойства. – Суздаль, 1996. – 231 с.

**References**

1. Zanosova V.I., Zaikovskaya E.S. Problemy ispol'zovaniya prirodnykh vod dlya orosheniya // Geograficheskie problemy Altaiskogo kraja. – Barnaul, 1991. – Ch. 1. – S. 135-136.

2. Makarychev S.V. Teplofizicheskoe sostoyanie pochv Altaya v usloviyakh antropogenezu. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 326 s.

3. Zanosova V.I. i dr. Vodno-resursnyi potentsial Zapadno-Sibirskogo regiona // Problemy ratsional'nogo prirodopol'zovaniya v Altaiskom krae: sb. nauch. tr. AGAU. – Barnaul, 2005. – S. 13-33.

4. Makarychev S.V., Mazirov M.A. Teplofizicheskie osnovy melioratsii pochv: uchebnoe posobie. – M.: Khimiya v sel'skom khozyaistve, 2004. – 290 s.

5. Panfilov V.P. Agrofizicheskaya kharakteristika pochv Zapadnoi Sibiri. – Novosibirsk: Nauka, 1976. – 544 s.

6. Panfilov V.P., Makarychev S.V., Lunin A.I. i dr. Teplofizicheskie svoistva i rezhimy chernozemov Priob'ya. – Novosibirsk: Nauka, 1981. – 118 s.

7. Tikhonravova P.I. Osobennosti temperaturnogo rezhima i teplofizicheskikh svoistv oroshayemykh pochv solontsovogo kompleksa Zavolzh'ya. – M., 1988. – 23 s.

8. Makarychev S.V., Gefke I.V., Shishkin A.V. Teplofizicheskoe sostoyanie chernozemov plodovykh sadov Altaiskogo Priob'ya. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2008. – 191 s.

9. Mazirov M.A., Makarychev S.V. Teplofizika pochv: metody i svoistva. – Suzdal', 1996. – 231 s.

