

10. Gar K.A. Metody ispytaniya toksichnosti i effektivnosti insektitsidov. – M., 1963. – 286 s.

11. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta. – M.: Kolos, 1986. – 502 s.

12. Ilinskaya L.I., Ozertsovskaya O.L. Produkty lipoksigeпаznogo okisleniya zhirnykh kislot kak signalnye molekuly v indutsirovaniі ustoychivosti rasteniy // Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya. – 1998. – T. 34, No. 5. – S. 467-479.



УДК 631.6:631.445.53(571.15)

С.В. Макарычев  
S.V. Makarychev

## АГРОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЧЕРНОЗЕМНО-ЛУГОВЫХ СОЛОНЦОВ

### AGROTECHNICAL METHODS OF IMPROVING THERMOPHYSICAL CONDITION AND HYDROTHERMAL REGIMES OF CHERNOZEMIC-MEADOW SOLONETZ SOILS

**Ключевые слова:** солонец, черноземно-луговой, температура, влажность, плотность, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, тепловой поток.

Климат почв в условиях Сибири является основной причиной сокращенного вегетационного периода. Имеющиеся здесь ресурсы тепла не всегда обеспечивают полное вызревание районированных сортов зерновых культур. В этом плане необходимо улучшать и регулировать не только водный, но и тепловой режим агрогенных почв Сибири. Значительную роль в формировании теплофизического режима почвы играет ее пахотный слой. Здесь чаще возникают экстремальные для растений температуры и связанные с ними неблагоприятные явления, снижающие продуктивность сельскохозяйственных культур. Землевание является одним из эффективных агротехнических приемов мелиоративного воздействия на солонцы с целью повышения их плодородия и создания благоприятного теплофизического состояния в корнеобитаемом слое почвы. Оно не приводит к ухудшению геохимической обстановки агроландшафта в сухостепной зоне Алтайского края. При землевании наиболее экстремальные условия складываются на контрольном немелиорированном участке, где колебания температур, тепло- и температуропроводности, а также тепловых потоков велики. Лучшие теплофизические и гидротермические параметры имеют место на вариантах с использованием поверхностного и тем более удобрительного землевания. Применение комбинированных приемов позволяет максимально снизить как суточную, так и сезонную степень колебаний теплофизических свойств почвы, обеспечивая тем самым оптимальный тепловой режим для сельскохозяйственных культур.

Использование различных агротехнических приемов мелиорации солонцов дает возможность регулирования теплофизическим состоянием и гидротермическим режимом их пахотного горизонта.

**Keywords:** chernozemic-meadow solonetz soil, temperature, moisture content, density, thermal capacity, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat flux.

Soil climate in Siberia is the main reason for the short growing season. The heat resources available do not always ensure the full ripening of the released varieties of cereal crops. In this regard, both water and thermal regimes of agrogenic soils of Siberia should be improved and controlled. Soil arable layer plays a significant role in the formation of soil thermal regime. It is here where the extreme temperatures for plants often occur and reduce crop productivity. Earth mulching is one of the efficient agronomic practices of reclamation impact on solonetz soils in order to increase their fertility and create a favorable thermal condition in the soil root layer. It does not lead to deterioration of the geochemical situation of the agricultural landscape in the dry steppe zone of the Altai Region. When earth mulching is applied, the most extreme conditions are formed in the control plot which is not mulched; the fluctuations of temperature, thermal conductivity and diffusivity, and heat flows are significant. The best thermo-physical and hydrothermal indices are revealed in the variants with surface and fertilizing earth mulching. The use of combined methods allows minimizing both daily and seasonal degree of fluctuations of soil thermo-physical properties, thus providing the optimal thermal regime for crops. The use of various agrotechnical methods of solonetz soil reclamation makes it possible to regulate the thermo-physical condition and hydrothermal regime of their arable horizons.

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

**Makarychev Sergey Vladimirovich**, Dr. Bio. Sci., Prof., Head, Physics Dept., Altai State Agricultural University. E-mail: phys\_asau@rambler.ru.

### Введение

Климат почв в условиях Сибири является основной причиной сокращенного вегетационного периода. Имеющиеся здесь ресурсы тепла [1] не всегда обеспечивают полное вызревание районированных сортов зерновых культур, особенно в годы с повышенным атмосферным и почвенным увлажнением.

В этом плане необходимо улучшать и регулировать не только водный, но и тепловой режим пахотных почв Сибири [2, 3]. Значительную роль в формировании теплофизического режима почвы играет ее пахотный слой. В нем происходит превращение лучистой энергии в тепловую и определяются ее расходные статьи, закладываются основы теплового режима в глубоких слоях почвенной толщи. Здесь чаще возникают экстремальные для растений температуры и связанные с ними неблагоприятные явления, снижающие продуктивность сельскохозяйственных культур. Но вместе с тем здесь же кроются и возможности направленного регулирования теплофизическим режимом почв через воздействие на физико-химические свойства пахотного слоя.

Землевание является одним из эффективных агротехнических приемов мелиоративного воздействия на солонцы с целью повышения их плодородия и создания благоприятного теплофизического состояния в корнеобитаемом слое почвы. Оно не приводит к ухудшению геохимической обстановки агроландшафта в сухостепной зоне Алтайского края. Эксперименты по землеванию впервые были проведены Н.В. Орловским в 1936 г. в Омской области, а затем продолжены на Убинской опытно-мелиоративной станции. Позднее землевание солонцовых пятен было организовано И.Н. Антиповым-Каратаевым. Первый опыт по землеванию солонцов в Алтайском крае был заложен в 1984 г. в Романовском районе Алтайского края И.Т. Трофимовым с сотрудниками лаборатории солонцов Алтайского СХИ [4-6].

### Объекты и методы

Объектом исследований явились черноземно-луговые солонцы, сформированные на территории совхоза «Гуселетовский» Романовского района. **Цель** – изучение влияния землевания на теплофизическое состояние и гидротермические режимы мелиорированных солонцов [7].

Плотность и влажность пахотного слоя солонца определялись весовым методом. Температура измерялась электронным термометром, а теплофизические коэффициенты – импульсным методом плоского нагревателя [8-10].

### Результаты исследований

Влияние различных способов землевания солонцов и их сочетания с другими агроприемами на их теплофизические свойства изучались нами в 1988-1989 гг. Эти наблюдения проводились на солонце черноземно-луговом с содержанием обменного натрия 44% от емкости. На мелиорированных участках возделывалась пшеница сорта Вега. На всех вариантах опыта была определена плотность сложения пахотного горизонта. Максимальной она оказалась на солонце естественного происхождения (контроль) и составила здесь 1,33 г/см<sup>3</sup>. На вариантах, где было проведено землевание с внесением определенной дозы удобрений, она составила от 1,1 до 1,2 г/см<sup>3</sup>, а минимальной плотность сложения была на варианте с поверхностным землеванием (0,9-1,0 г/см<sup>3</sup>).

Мелиорация солонца при использовании различных сочетаний агротехнических приемов привела к неоднозначному воздействию на гидротермические параметры (температура и влажность) и теплофизическое состояние почвы (теплоемкость, тепло- и температуропроводность, тепловой поток). Результаты комплексного исследования различных показателей в начале и в конце вегетации показали, что на исследованных вариантах складываются неодинаковые условия

для аккумуляции и распространения тепла и влаги в верхнем корнеобитаемом слое.

Измерение почвенной влажности дало возможность установить, что в июне максимальное увлажнение было на контрольном варианте или на немелиорированном солонце (24,8% от массы сухой почвы), а также на делянках с удобрительным землеванием (табл. 1). На вариантах с поверхностным и смешанным землеванием увлажнение пахотного слоя оказалось ниже (17-18%). В конце вегетационного периода (сентябрь) распределение влаги в мелиорированном горизонте солонца кардинальным образом изменилось. На контрольном участке влажность снизилась до 17%, на делянках с удобрительным землеванием – до 18,5%. Там, где применялись смешанные способы мелиорации, почвенное влагосодержание возросло в некоторых случаях до 26-29% от массы почвы. Увеличилась влажность и на вариантах с поверхностным землеванием.

Так как на всех вариантах возделывалась пшеница одного сорта (Вега), то следует отметить, что процесс влагонакопления зависит от вида агроприема или от сочетания использованных способов мелиорации засоленных почв. Эти результаты дают возможность регулирования водного режима мелиорированных солонцов.

Особенности микроагрегатного или структурного сложения мелиорированного слоя солонца и накопленных в нем запасов органического вещества, тепла и влаги определенным образом сказались на распределении и величине теплофизических коэффициентов, таких как объемная теплоемкость, тепло- и температуропроводность. В таблице 1 представлены значения этих коэффициентов в начале и конце вегетации в 11:00 ч дня.

Объемную теплоемкость почвы в течение суток мы приняли постоянной, так как почвенное влагосодержание за это время в слое 0-20 см изменялось незначительно (в пределах 2-3%). Кроме того, теплоемкость слабо зависит от температуры, поэтому ее суточные колебания не превышают погрешности измерений и нами не учитывались. Из данных таблицы 1 следует, что максимум теплоемкости имел место на контроле, кото-

рый характеризовался наибольшей плотностью сложения ( $1,33 \text{ г/см}^3$ ) и повышенным влагосодержанием.

В июне теплоемкость оказалась максимальной на делянках, где проводилось удобрительное землевание. Диапазон ее изменений здесь составил (от 2,0 до 2,3) $\times 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \text{ K)}$ , что ниже, чем на контрольном варианте, на 15%. Пониженная плотность и увлажнение на участках с поверхностным и смешанным землеванием снизило объемную теплоемкость примерно до  $1,7 \times 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \text{ K)}$ . Ее наименьшие значения в начале вегетации имели место на вариантах с поверхностным земледелием на 5 см и сочетанием землевания с гипсованием, что вполне объяснимо, т.к. именно здесь сложились условия, характеризующиеся минимумом увлажнения и плотности сложения. В результате диапазон изменений объемной теплоемкости на всех мелиорированных участках в июне 1989 г. составил около 40%.

Осенью значения теплоемкости на различных вариантах сблизились. При этом предел ее изменений сократился до 20%, что явилось следствием снижения влагосодержания в пахотном слое почвы. При этом повышенное значение теплоемкости отмечалось на вариантах со смешанным землеванием, где было аккумулировано большее количество влаги.

Иначе обстояло дело с тепло- и температуропроводностью. Учитывая значительную степень зависимости коэффициентов теплопереноса от температуры, мы определили их значение в момент экстремальных температур на 10 см глубине. В течение суток температуропроводность изменялась на всех исследованных агрофонах в пределах 15-18%. Ее значения максимальны в 15:00 ч в случае использования поверхностного и смешанного землевания ( $0,38-0,40 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ ). В утренние часы при слабом прогревании почвы величины температуропроводности на различных вариантах сближаются. Из данных таблицы 1 следует, что осенью температуропроводность в почве уменьшается в среднем на 8-10%.

Влияние землевания на теплофизические свойства солонцов (11:00 ч)

Варианты землевания	t	U	Ср	a	λ	P
Контроль	<u>27,0</u>	<u>24,8</u>	<u>2,71</u>	<u>0,36</u>	<u>0,97</u>	<u>308</u>
	18,3	17,3	2,28	0,34	0,80	147
Поверхностное на 5 см	<u>24,2</u>	<u>18,8</u>	<u>1,66</u>	<u>0,38</u>	<u>0,63</u>	<u>175</u>
	17,8	22,6	1,81	0,34	0,62	70
Поверхностное на 10 см	<u>24,9</u>	<u>21,5</u>	<u>1,98</u>	<u>0,39</u>	<u>0,78</u>	<u>245</u>
	17,5	23,1	2,05	0,32	0,74	112
Удобрительное, запахан слой 15 см	<u>25,8</u>	<u>17,3</u>	<u>1,71</u>	<u>0,40</u>	<u>0,68</u>	<u>266</u>
	17,4	20,2	1,83	0,36	0,65	70
Удобрительное, запахан слой 5 см	<u>23,6</u>	<u>24,5</u>	<u>2,25</u>	<u>0,35</u>	<u>0,78</u>	<u>252</u>
	17,6	18,3	1,96	0,34	0,66	42
Удобрительное, запахан слой 10 см	<u>24,5</u>	<u>24,7</u>	<u>2,28</u>	<u>0,35</u>	<u>0,79</u>	<u>273</u>
	17,6	18,2	1,98	0,33	0,66	35
Удобрительное, запахан слой 15 см	<u>23,4</u>	<u>20,9</u>	<u>2,03</u>	<u>0,35</u>	<u>0,71</u>	<u>194</u>
	17,6	18,4	1,91	0,35	0,66	42
Удобрительное в рядок	<u>24,0</u>	<u>20,2</u>	<u>2,26</u>	<u>0,35</u>	<u>0,80</u>	<u>266</u>
	17,2	18,8	2,18	0,34	0,74	49
Поверхностное + удобрительное 5+5 см	<u>23,8</u>	<u>21,4</u>	<u>2,13</u>	<u>0,35</u>	<u>0,74</u>	<u>168</u>
	17,5	22,3	2,17	0,33	0,71	49
Поверхностное +удобрительное 10+10 см	<u>24,7</u>	<u>17,5</u>	<u>1,72</u>	<u>0,38</u>	<u>0,66</u>	<u>161</u>
	17,2	29,3	2,21	0,32	0,71	65
Поверхностное +удобрительное 15+15 см	<u>24,8</u>	<u>17,8</u>	<u>1,68</u>	<u>0,38</u>	<u>0,64</u>	<u>203</u>
	17,3	21,0	1,81	0,34	0,61	64
Поверхностное (10 см) + гипсование	<u>24,4</u>	<u>16,8</u>	<u>1,65</u>	<u>0,39</u>	<u>0,64</u>	<u>196</u>
	17,1	25,6	2,01	0,33	0,66	42

Примечание. t – температура, °С; U – влажность, %; Ср – объемная теплоемкость,  $10^6$  Дж/(кг/м<sup>3</sup>), a – температуропроводность,  $10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; λ – теплопроводность, Вт/(м К), P – тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup> в 11:00 в слое 0-20 см. Числитель – 22.06, знаменатель – 14.09.1989 г.

Характер изменений коэффициента теплопроводности обратный. Максимальна она на контроле и составляет в 17:00 ч 0,97 Вт/(м К); несколько ниже на участках с удобрительным землеванием (0,78 Вт/м К) и минимальна при смешанном – 0,66 Вт/м К. Диапазон варьирования составляет 30-35%. Утром при пониженной температуре теплопроводность уменьшается так же, как и в конце вегетации.

Полученная картина временного и пространственного распределения тепло- и температуропроводности определяется складывающимися в почвенном профиле гидротермическим режимом

и плотностью сложения пахотного слоя. Там, где выше плотность и степень почвенного влагосодержания, там теплопроводность больше, но меньше температуропроводность, максимум которой приурочен к влажности 16-18% от массы почвы.

Режим тепла и влаги, различное уплотнение и как следствие, варьирование теплофизических коэффициентов в мелиорированном слое солонца предопределили разброс в теплотоках на различных вариантах заложенного опыта (табл. 1).

В результате оказалось, что максимальный теплоток в почву летом 1989 г. наблюдался на контроле и равнялся 308 Вт/м<sup>2</sup>. Около 250 Вт/м<sup>2</sup> (в среднем) был он на вариантах с поверхностным и удобрительным землеванием. На участках с калиброванным землеванием наблюдался минимальный поток тепла, но который не опускался ниже 200 Вт/м<sup>2</sup>.

В конце вегетационного периода теплоток снизился на отдельных участках до 5 раз, оставаясь максимальными на контроле и участках с поверхностным землеванием. В силу более значительного иссушения почвы к осени при удобрительном землевании теплоток здесь уменьшились до (35-42) Вт/м<sup>2</sup>.

В таблице 2 представлены также тепловые потоки на исследованных делянках в различное

время суток 22-23 июня 1989 г. Поток тепла в почву рассчитывался в 7:00, 11:00 и 14:00, а из почвы в 17:00, 20:00, 23:00 ч.

Данные таблицы 2 показывают, что наиболее динамично тепло распространяется в верхнем (20 см) слое в 11:00 и 23:00 ч, а в 17:00 и 7:00 ч теплоперенос минимален. Аналогично среднему тепловому потоку за сутки количество распространяющегося тепла в фиксированные часы суток определяется тем или иным агрофоном. Максимальное количество тепла наблюдается на контроле (245 Вт/м<sup>2</sup> в 11:00). На участках с поверхностным и удобрительным землеванием поток тепла снижается в среднем до 180 Вт/м<sup>2</sup>, а при смешанных формах землевания – до 154 Вт/м<sup>2</sup>. Аналогичное распределение тепловых потоков наблюдается и в иное время суток.

Таблица 2

*Тепловые потоки на мелиорированном солонце в течение суток 22-23 июня 1989 г. (P, Вт/м<sup>2</sup>)*

Варианты землевания	Время суток					
	14:00	17:00	20:00	23:00	7:00	11:00
Контроль	133	-14	-139	-154	84	245
Поверхностное на 5 см	77	0	-77	-98	42	133
Поверхностное на 10 см	112	-7	-119	-133	63	182
Поверхностное на 15 см	119	-14	-49	-56	42	182
Удобрительное на 5 см	97	-28	-125	-140	84	217
Удобрительное на 10 см	105	-28	-126	-140	70	217
Удобрительное на 15 см	49	-21	-91	-105	77	168
Удобрительное в рядок	94	-21	-45	-72	72	203
Поверхностное +удобрительное на 5+5 см	77	-35	-126	-119	84	182
Поверхностное +удобрительное 10+10 см	56	-28	-77	-98	56	154
Поверхностное + удобрительное на 15+15 см	70	-35	-91	-91	72	168
Поверхностное (10 см) + гипсование	84	-28	-98	-98	56	154

### Выводы

1. Наиболее экстремальные условия складываются на контрольном немелиорированном участке, где колебания температур, тепло- и теплопроводности, а также тепловых потоков велики.

2. Лучшие теплофизические и гидротермические параметры имеют место на вариантах с использованием поверхностного и тем более удобрительного землевания. Применение комбинированных приемов позволяет максимально снизить как суточную, так и сезонную степень колебаний теплофизических свойств почвы, обеспечивая тем самым оптимальный тепловой режим для культурных сельскохозяйственных растений.

3. Использование различных агротехнических приемов мелиорации солонцов дает возможность регулирования теплофизическим состоянием и гидротермическим режимом их корнеобитаемого пахотного горизонта.

### Библиографический список

1. Панфилов В.П. Пути регулирования теплового режима почв Сибири // Комплексные мелиорации. – М.: Наука, 1980. – С. 225-230.
2. Мазиров М.А., Макарычев С.В. Теплофизика почв: антропогенный фактор. – Суздаль: ГУ КПК, 1997. – 186 с.
3. Шеин Е.В., Болотов А.Г., Мазиров М.А., Мартынов А.И. Моделирование теплового режима почвы по амплитуде температуры приземного воздуха // Земледелие. – 2017. – № 7. – С. 26-28.
4. Трофимов И.Т., Вялкова Д.И. Опыт мелиорации солонцов сухостепной зоны Алтайского края // Эффективность удобрений в севооборотах Алтайского края. – Барнаул: Изд-во АСХИ, 1988. – С. 98-110.
5. Назарчук А.Г. Мелиорация солонцов землеванием. – М.: Колос, 1995. – С. 5-94.
6. Пудовкина Т.А. Засоленные почвы зоны влияния Кулундинского канала // Особенности мелиорации солонцово-солончаковых почв Западной Сибири: сб науч. тр. – Омск: Изд-во ОмСХИ. – 1986. – С. 28-33.

7. Макарычев С.В. Теплофизические свойства выщелоченных черноземов Алтайского Приобья: автореф. дис. ... канд. биол. наук / ИПА СО АН СССР. – Новосибирск, 1980. – 24 с.

8. Болотов А.Г. Измерение температуры почв в полевых условиях // Антропогенное воздействие на лесные экосистемы: сб. матер. II Междунар. науч.-практ. конф. – Барнаул, 2002. – С. 148-150.

9. Bolotov A.G., Shein E.V., Makarychev S.V. Water retention capacity of soils in the Altai Region // Eurasian Soil Science. – 2019. – Vol. 52. – № 2. – P. 187-192.

10. Болотов Г.А., Беховых Ю.В., Семенов Г.А. Определение теплофизических свойств капиллярно-пористых тел импульсным методом с использованием технологии визуального программирования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2012. – № 6 (68). – С. 37-40.

### References

1. Panfilov V.P. Puti regulirovaniya teplovogo rezhima pochv Sibiri // Kompleksnye melioratsii. – M: Nauka, 1980. – S. 225-230.
2. Mazirov M.A., Makarychev S.V. Teplofizika pochv: antropogennyy faktor. – Suzdal: GU KPK, 1997. – 186 s.
3. Shein Ye.V., Bolotov A.G., Mazirov M.A., Martynov A.I. Modelirovanie teplovogo rezhima pochvy po amplitude temperatury prizemnogo vozdukh // Zemledelie. – 2017. – No. 7. – S. 26-28.
4. Trofimov I.T., Vyalkova D.I. Opyt melioratsii solontsov sukhostepnoy zony Altayskogo kraya // Effektivnost udobreniy v sevooborotakh Altayskogo kraya. – Barnaul: Izd-vo ASKHI, 1988. – S. 98-110.
5. Nazarchuk A.G. Melioratsiya solontsov zemlevaniem. – M: Kolos, 1995. – S. 5-94.
6. Pudovkina T.A. Zasolennye pochvy zony vliyaniya Kulundinskogo kanala // Sb nauch. tr. Osobennosti melioratsii solontsovo-solonchakovykh pochv Zapadnoy Sibiri. – Omsk: Izd-vo OmSKHI, 1986. – S. 28-33.
7. Makarychev S.V. Teplofizicheskie svoystva vyshchelochennykh chernozemov Altayskogo Priobya: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk // IPA SO AN SSSR. – Novosibirsk, 1980. – 24 s.

8. Bolotov A.G. Izmerenie temperatury pochv v polevykh usloviyakh // Sb. materialov II mezhd. nauch.-prak. konf. Antropogennoe vozdeystvie na lesnye ekosistemy. – Barnaul, 2002. – S. 148-150.

9. Bolotov A.G., Shein E.V., Makarychev S.V. Water Retention Capacity of Soils in the Altai Region. *Eurasian Soil Science*, 52 (2): 187-192 (2019). doi: 10.1134/S1064229319020030.

10. Bolotov G.A., Bekhovikh Yu.V., Semenov G.A. Opredelenie teplofizicheskikh svoystv kapillyarno-poristykh tel impulsnym metodom s ispolzovaniem tekhnologii vizualnogo programmirovaniya // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – 2012. – No. 6 (68). – S. 37-40.



УДК 631.445.4:504.53.06



**О.В. Коваленко, Ю.Н. Сыромятников**  
O.V. Kovalenko, Yu.N. Syromyatnikov

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСЛОКАЦИИ  
МИКРОЭЛЕМЕНТОВ-МЕТАБОЛИТОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ  
В УСЛОВИЯХ ЕЕ ПОЛИЭЛЕМЕНТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

**THE MATHEMATICAL MODELING OF TRACE ELEMENT METABOLITE TRANSLOCATION  
IN THE SOIL – PLANT SYSTEM UNDER THE CONDITIONS  
OF ITS MULTIPLE-ELEMENT POLLUTION WITH HEAVY METALS**

**Ключевые слова:** микроэлементы, почва, растения, загрязнение почвы.

**Keywords:** trace elements, soil, plants, soil pollution.

Доказана возможность использования метода математического моделирования как одного из подходов для изучения закономерностей транслокации микроэлементов-метаболитов (Zn, Fe, Co, Mn, Cu) в системе почва-растение при различных уровнях ее техногенной нагрузки Cd, Pb, Ni, Cr в условиях микрополевого опыта на черноземе подзолистом тяжелосуглинистом. Сформулированы основные принципы построения многофакторных регрессионных моделей и дана оценка транслокации микроэлементов под действием тяжелых металлов в системе почва-растение.

This paper proves the possibility of using the method of mathematical modeling as one of the approaches to study the patterns of translocation of trace element metabolites (Zn, Fe, Co, Mn, Cu) in the soil – plant system at various levels of its technogenic load with Cd, Pb, Ni, Cr in a micro-field experiment in podzolic and heavily loamy chernozem soil. The basic principles of the construction of multivariate regression models are formulated and the translocation of trace elements under the action of heavy metals in the soil – plant system is evaluated.