

ВЛАЖНОСТЬ КАК ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛОАККУМУЛЯЦИИ В ПРОФИЛЕ ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ

MOISTURE CONTENT AS ONE OF THE MAIN FACTORS IN MODELING THE FEATURES OF HEAT ACCUMULATION IN PODZOLIC SOIL PROFILES

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, объёмная теплоемкость, информационно-логическая модель, каналы связи, информативность, доля влияния, влажность, плотность, содержание гумуса.

Влажность играет первостепенную и наиболее динамичную роль среди множества факторов, влияющих на теплоаккумулирующие свойства почв (гранулометрический состав, плотность, содержание органического вещества). Целью исследования явилось количественное оценивание влияния градиентов и динамики влажности на особенности аккумуляции тепла в генетических горизонтах подзолистой почвы путем построения и верификации детализированной физической модели. Все ключевые свойства почвы, имеющие генетическое и агропроизводственное значение, формируются в результате множества элементарных почвенных процессов. Для определения вклада каждого из этих процессов необходимы количественные методы оценки. Мы использовали информационно-логический анализ, заключающийся в оценке силы связи между признаками путем сопоставления априорной вероятности всей выборки с условными вероятностями каждого фактора. Установлены степень и характер связи объемной теплоемкости дерново-подзолистой почвы и влажности. Увеличение влажности гумусно-аккумулятивных горизонтов на исследуемых участках приводит к повышению значений объемной теплоемкости на 1 ранг. Следует отметить, что при влажности 15-20% ранг коэффициента теплоаккумуляции не изменяется. Общая информативность на рассматриваемых вариантах достаточно высокая и составляет $T=1,1997$ и $T=1,1269$ соответственно. Полученные значения информативности позволили оценить долю влияния влажности на объемную теплоемкость. В травяном бору она составила 25,3%, в свежем бору – 24,8%. Проведенное исследование позволило установить количественную зависимость теплоаккумулирующей способности профиля подзолистых почв от пространственно-временной динамики влажности. Подтверждена ключевая роль влажности как доминирующего фактора, модулирующего теплофизические свойства генетических горизонтов

подзолистой почвы. Разработана и верифицирована математическая модель теплоаккумуляции. Установлено, что сезонная динамика влажности является основным регулятором теплового режима почвы. Выявлен механизм формирования контрастного теплового режима в профиле дерново-подзолистой почвы.

Keywords: *sod-podzolic soil, volumetric thermal capacity, information-logical model, communication channels, informational value, share of influence, moisture content, density, humus content.*

Moisture plays a primary and most dynamic role among the many factors influencing the heat accumulating properties of soils (particle size distribution, density, organic matter content). The research goal was to quantitatively evaluate the influence of moisture gradients and dynamics on heat accumulation characteristics in the genetic horizons of podzolic soil by constructing and verifying a detailed physical model. All key soil properties of genetic and agricultural significance are formed as a result of numerous elementary soil processes. Quantitative assessment methods are required to determine the contribution of each of these processes. We used information-logical analysis which involved evaluating the strength of the relationship between the features by comparing the a priori probability of the entire sampling with the conditional probabilities of each factor. The degree and nature of the relationship between the volumetric thermal capacity of sod-podzolic soil and moisture content were determined. An increase of the moisture content of the humus-accumulative horizons in the study areas leads to an increase of the volumetric thermal capacity values by one rank. It is noteworthy that at moisture content of 15-20%, the rank of the heat accumulation coefficient does not change. The overall informational value for the considered variants is quite high and amounts to $T = 1.1997$ and $T = 1.1269$, respectively. The obtained informational content values allowed estimating the share of the influence of moisture content on the volumetric thermal capacity. In the grass pine forest, it was 25.3%, and in the fresh pine forest - 24.8%. The conducted study allowed determining quantitative dependence of the heat-accumulating capacity of podzolic

soil profiles on the spatiotemporal moisture dynamics. The key role of moisture content as a dominant factor modulating the thermophysical properties of the genetic horizons of podzolic soil was confirmed. A mathematical model of heat accumulation was developed and verified.

Шорина Ирина Владимировна, к.с.-х.н., доцент, зав. кафедрой информационных технологий, Алтайский государственный педагогический университет, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: shorina_iv@altspu.ru.

Гефке Ирина Валентиновна, к.с.-х.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ivgefke@mail.ru.

Введение

Эффективное функционирование и устойчивость агроэкосистем в условиях изменяющегося климата в значительной степени определяются тепловым режимом почв. Теплоаккумулирующая способность почвенного профиля является ключевым параметром, регулирующим микроклимат приземного слоя атмосферы, скорость биохимических процессов, жизнедеятельность почвенной биоты и, в конечном счете, продуктивность сельскохозяйственных культур. В этой связи разработка точных и адекватных моделей, прогнозирующих динамику тепловых потоков в почве, представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Особый интерес в данном контексте представляют подзолистые почвы, широко распространенные в зоне рискованного земледелия и характеризующиеся четко выраженной генетической дифференциацией профиля на элювиальные и иллювиальные горизонты. Эта морфологическая неоднородность обуславливает сложный характер перераспределения и накопления тепла, который до сих пор остается недостаточно изученным. Существующие модели теплообмена зачастую опираются на упрощенные представления о почве как об однородной среде, что приводит к значительным погрешностям при прогнозировании ее теплового состояния.

Вместе с тем среди множества факторов, влияющих на теплоаккумулирующие свойства почв (гранулометрический состав, плотность, содержание органического вещества), именно влажность играет первостепенную и наиболее динамичную роль. Будучи высоковариабельным параметром, влажность напрямую определяет такие ключевые теплофизические характеристики, как теплоемкость и теплопроводность [1, 2].

It was determined that seasonal moisture dynamics was the main regulator of the soil thermal regime. The mechanism of formation of a contrasting thermal regime in the sod-podzolic soil profile was revealed.

Шорина Ирина Владимировна, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Altai State Pedagogical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: shorina_iv@altspu.ru.

Гефке Ирина Валентиновна, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ivgefke@mail.ru.

Однако количественная оценка вклада влажности в формирование особенностей теплоаккумуляции именно в гетерогенном профиле подзолистых почв, с учетом специфики каждого генетического горизонта, является проблематичной и фрагментарно отраженной в специальной литературе.

Таким образом, возникает очевидное противоречие между необходимостью точного прогнозирования теплового режима подзолистых почв и недостаточностью исследований, посвященных роли влажности как доминирующего фактора, модулирующего этот процесс в условиях стратифицированного почвенного профиля.

Целью исследования явилось количественное оценивание влияния градиентов и динамики влажности на особенности аккумуляции тепла в генетических горизонтах подзолистой почвы путем построения и верификации детализированной физической модели, определение доли влияния различных факторов на объемную теплопемкость дерново-подзолистых почв.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

- 1) провести лабораторное определение теплофизических характеристик (объемной теплопемкости, теплопроводности) основных генетических горизонтов подзолистой почвы в диапазоне значений влажности, соответствующих их полевой изменчивости;
- 2) разработать математическую модель теплоаккумуляции для гетерогенного почвенного профиля, явным образом учитывая функциональную зависимость теплофизических параметров от влажности в каждом горизонте;
- 3) выполнить верификацию модели на основе натурных данных мониторинга температурных полей и влажности в почвенном профиле;

4) провести серию расчетных экспериментов для оценки вклада влажностного фактора в формирование теплоаккумулирующей способности подзолистых почв в различных гидротермических условиях.

Объекты и методы

Объектом исследования определена дерново-подзолистая почва под сосновыми насаждениями, произрастающими в свежих лесорастительных условиях и в условиях травяного бора пригородных лесов Барнаула, являющихся частью Барнаульского ленточного бора. Опытные участки расположены на разном удалении от черты города в Барнаульском лесничестве.

Все ключевые свойства почвы, имеющие генетическое и агропроизводственное значение, формируются в результате множества элементарных почвенных процессов. Для определения вклада каждого из этих процессов необходимы не только качественные, но и количественные методы оценки. В связи с этим, широко применяются методы множественной корреляции, регрессии и информационно-логического анализа.

В данной работе, наряду с методами множественной корреляции и регрессии, используется информационно-логический анализ. В его основе лежит оценка силы связи признаков путем сравнения априорной вероятности генеральной совокупности с условными вероятностями отдельных факторов. Главное достоинство этого метода – возможность работы с данными любой природы, без требований к их распределению [3].

В ходе исследования зависимости объемной теплоемкости почвы от её физических свойств были собраны локальные экспериментальные данные. Применение информационно-логического анализа позволило установить степень и характер взаимосвязи теплоемкости такими параметрами, как плотность, содержание гумуса и влажность почвы в горизонтах на участках с травянистой и свежей боровой растительностью. Установленные закономерности открывают перспективы для прогнозирования динамики теплоемкости и оценки влияния ключевых факторов на её изменение [4-7].

Вклад каждого из факторов в формирование объемной теплоемкости определяется по следующей формуле:

$$Д = Т : Н(А) \cdot 100\%,$$

где $Д$ – доля влияния приведенного фактора на значение объемной теплоемкости, %;

T – общая информативность, бит,
 $H(A)$ – неопределенность по рассматриваемому фактору, бит [8].

Результаты исследований и их обсуждение

Лес является ключевым фактором почвообразования. Хвойные леса способствуют интенсификации процессов подзолования и образованию подзолистых слоев, тогда как лиственные деревья замедляют эти процессы и способствуют образованию гумуса. Таким образом, главная биологическая функция леса заключается в постоянном поступлении, трансформации и дальнейшем усвоении растениями органического вещества. Лесная растительность активно преобразует почву, которая, в свою очередь, оказывает влияние на всю экосистему леса.

Исследования показали, что верхние слои почвы рассматриваемых образцов травяного бора (Трб) имеют низкое содержание гумуса и слабую гумусированность. Здесь колебание гумуса оставило от 3,1 до 5,5%. Более резкие колебания в содержании органического вещества в гумусово-аккумулятивном горизонте отмечались на участках, расположенных на территориях Барнаульского лесничества, относящиеся к типу свежего бора (Свб). На этих участках колебания составили от 1,5 до 4,5%.

Низкое содержание гуминовых кислот в хвое соснового бора замедляет образование гумуса. На этот процесс также существенно влияют температурные колебания и теплофизические характеристики почвенного профиля.

Для оценки влияния почвенно-физических факторов на объемную теплоемкость генетических горизонтов почвы был применен информационно-логический анализ. Данный метод позволил количественно и качественно охарактеризовать зависимости коэффициента теплоаккумуляции C_p от плотности, содержания гумуса и влажности почв разного генезиса (рис. 1).

Исследование данных показало, что с увеличением гумусированности теплоемкость почвы уменьшается как на участках травяного бора, так и на участках свежего бора. Следует отметить, что общая информативность в обоих случаях была достаточно высокой и составляла $T_{Trb}=0,4637$ и $T_{Cvb}=0,445$ соответственно.

Эффективность каналов связи при обработке данных на участках травяного бора ($K=0,4661$) оказалась ниже, чем участков свежего бора ($K=0,4801$).

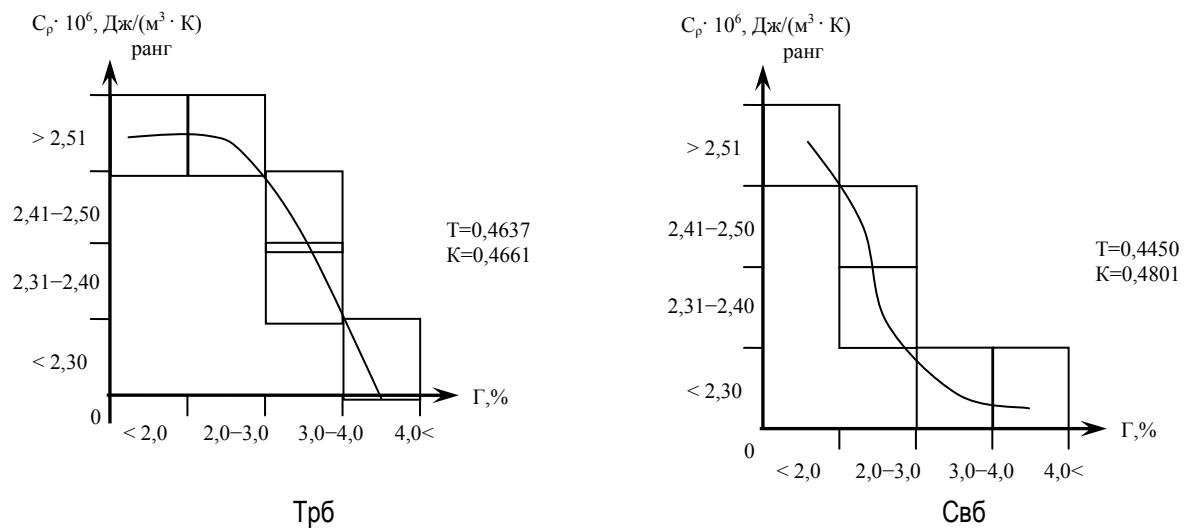


Рис. 1. Влияние содержания гумуса на объёмную теплоемкость в гумусно-аккумулятивных горизонтах

В результате доля участия содержания гумуса в величине объёмной теплоемкости составила 18,6% в травяном бору и 17,8% на участках свежего бора.

Помимо прочих факторов на объёмную теплоемкость почв на опытных участках Сvb и Trb существенно влияет плотность генетических горизонтов. Графические зависимости степени и характера связи объёмной теплоемкости от плотности наглядно представлены на рисунке 2.

Результаты исследования свидетельствуют о высокой степени связи между этими параметрами. Плотность сложения генетических горизонтов является доминирующим фактором, определяющим теплофизические характеристики чернозема в обоих случаях, причем характер

этой зависимости практически не отличается для участков травяного бора (информационность $T=1,2454$ бит) и свежего бора (информационность $T=1,2262$ бит).

Эффективность каналов связи составляет $K=0,6721$ и $K=0,7764$ соответственно. В результате доля влияния плотности почвы в гумусно-аккумулятивных горизонтах под различными агроценозами составила 42,0% (Trb) и 37,8% (Cvb).

Аналогично были установлены степень и характер связи объёмной теплоемкости дерново-подзолистой почвы с уровнем влажности U. Выявлено, что увеличение влажности почвенного профиля обуславливает постепенное возрастание коэффициента теплоаккумуляции (рис. 3).

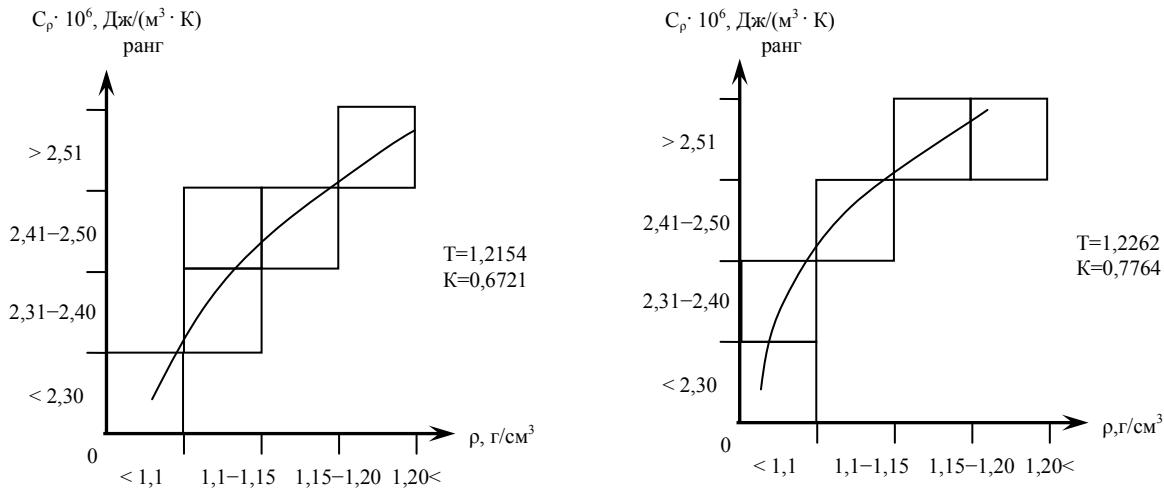


Рис. 2. Влияние плотности на объёмную теплоемкость в гумусно-аккумулятивных горизонтах

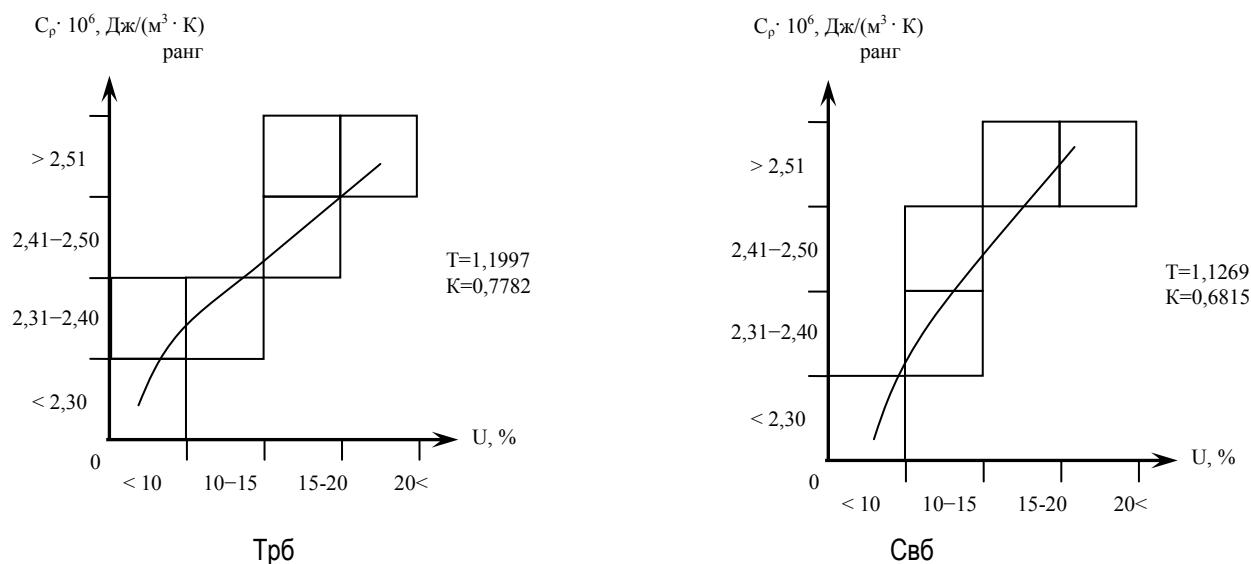


Рис. 3. Влияние влажности на объемную теплоемкость в гумусно-аккумулятивных горизонтах

Результаты анализа свидетельствуют о том, что повышение влажности гумусно-аккумулятивных горизонтов на исследуемых участках приводит к росту значений объемной теплоемкости на один ранг. Следует отметить, что при влажности 15-20% ранг коэффициента теплоаккумуляции не изменяется. Общая информативность на рассматриваемых вариантах достаточно высокая и составляет $T=1,1997$ и $T=1,1269$

соответственно. Полученные значения информативности позволили оценить долю влияния влажности на объемную теплоемкость. В травяном бору она составила 25,3%, в свежем бору – 24,8%.

Результаты информационно-логического моделирования объемной теплоемкости дерново-подзолистой почвы представлены в таблице.

Таблица

Влияние состояния факторов на объемную теплоемкость дерново-подзолистой почвы (числитель – травяной бор, знаменатель – свежий бор)

Факторы	T, бит	K	H(A), бит	D, %
Содержание гумуса, Г	0,4637	0,4661	2,5611	18,6
	0,4450	0,4801	2,5001	17,8
Плотность, ρ	1,2154	0,6721	2,8938	42,0
	1,2262	0,7764	3,2439	37,8
Влажность, U	0,8997	0,6523	3,5561	25,3
	0,7500	0,3755	3,0242	24,8

Исходя из рассчитанных коэффициентов эффективности канала связи, учитывающих объемную теплоемкость, все факторы выстраиваются в следующую последовательность: $\rho > U > Г$.

Анализ данных и рассчитанные коэффициенты эффективности каналов связи дают возможность количественно определить, как объемная теплоемкость дерново-подзолистой почвы (C_p) зависит от исследуемых параметров. На основе этого строится информационно-логическая модель вида:

$C_p = \rho \boxtimes [U \boxtimes Г]$,
где C_p – ранг теплоемкости почвы;
 ρ – ранг теплоемкости по плотности почвы;
 U – ранг теплоемкости по влажности почвы;

$Г$ – ранг теплоемкости почвы по содержанию гумуса;

\boxtimes – знак операции логической функции нелинейного произведения.

С помощью модели осуществляется прогнозирование объемной теплоемкости в зависимости от состояния определенных факторов.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить количественную зависимость теплоаккумулирующей способности профиля подзолистых почв от пространственно-временной динамики влажности. В результате работы были получены следующие основные выводы:

1. Экспериментально подтверждена ключевая роль влажности как доминирующего фактора, модулирующего теплофизические свойства генетических горизонтов подзолистой почвы. Установлено, что изменение влажности в диапазоне от наименьшей влагоемкости до полного насыщения приводит к нелинейному росту объемной теплоемкости и теплопроводности, причем интенсивность этого роста максимальна в гумусово-элювиальном горизонте и минимальна в иллювиальном, что связано с различиями в гранулометрическом составе и плотности сложения.

2. Разработана и верифицирована математическая модель теплоаккумуляции, принципиальным отличием которой является дискретный учет специфики функциональных зависимостей «влажность – теплофизическая характеристика» для каждого генетического горизонта. Верификация модели на основе натурных данных показала ее высокую адекватность с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,91$ между расчетными и фактическими значениями температуры на всех глубинах профиля.

3. Путем серии расчетных экспериментов установлено, что сезонная динамика влажности является основным регулятором теплового режима почвы. Показано, что в периоды весеннего снеготаяния и осенних дождей влажностный фактор обуславливает до 70-80% вариабельности теплоаккумулирующих свойств профиля, в то время как в засушливые периоды его вклад снижается до 40-50%, уступая ведущую роль радиационным характеристикам.

4. Выявлен механизм формирования контрастного теплового режима в профиле, который заключается в возникновении «теплоизолирующих» прослоек на границах генетических горизонтов с резко различной влажностью. Данный эффект, не учитываемый в моделях для однородной среды, существенно влияет на скорость весеннего прогрева и глубину промерзания почвы.

Библиографический список

1. Мазиров, М. А. Теплофизическая характеристика почвенного покрова Алтая и западного Тянь-Шаня / М. А. Мазиров, С. В. Макарычев. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2002. – 448 с. – Текст: непосредственный.
2. Макарычев, С. В. Теплоемкость почв разного генезиса как функция почвенно-физических факторов / С. В. Макарычев. – Текст: непосредственный // Вестник научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. – 2019. – № 13. – С. 103-108.
3. Дайнеко, Е. К. Опыт применения информационно-логического анализа для выяснения взаимосвязей между факторами почвообразования и некоторыми морфологическими свойствами почв / Е. К. Дайнеко, В. М. Фридланд. – Текст: непосредственный // Почвенные комбинации и их генезис. – Москва, 1972.
4. Бурлакова, Л. М. Применение информационно-логического анализа в агрономии / Л. М. Бурлакова. – Текст: непосредственный // Современные методы исследований в агрономии: сборник научных трудов. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 1990. – С. 29-36.
5. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – 5-е изд., доп. и перераб. – Москва: Агропромиздат, 1985. – 351 с. – Текст: непосредственный
6. Gefke, I., Zharkova, S. (2019). The effect of the sum of soil temperatures on the yield model of onion (*Allium cepa* L.) in the High Altai Priobye. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 395. 012026. DOI: 10.1088/1755-1315/395/1/012026.
7. Панкова, Т. И. Возможности моделирования плодородия почв на основе информационно-логического анализа / Т. И. Панкова, Н. П. Масютенко, Е. В. Колтышева. – Текст: непосредственный // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 4. – С. 8-16.
8. Шорина, И. В. Влияние экспозиции склона на гидротермический режим и тепловые свойства чернозема выщелоченного в условиях Алтайского Приобья / И. В. Шорина, С. В. Макарычев. – DOI 10.53083/1996-4277-2023-219-1-30-37. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2023. – № 1 (219). – С. 30-37.

References

1. Mazirov, M. A. Teplofizicheskaya kharakteristika pochvennogo pokrova Altaya i Zapadnogo Tyan-Shanya / M. A. Mazirov, S. V. Makarychev. – Vladimir: Izd-vo VIGU, 2002. – 448 s.
2. Makarychev S. V. Teploemkost pochv raznogo genezisa kak funktsiya pochvennofizicheskikh faktorov // Vestnik Nauchno-metodicheskogo soveta po prirodoobustroystvu i vodopolzovaniyu. – 2019. – No. 13. – S. 103-108.
3. Dayneko E. K., Fridland V. M. Opyt primeneniya informatsionno-logicheskogo analiza dlya vyyasneniya vzaimosvyazey mezhdru faktorami pochvoobrazovaniya i nekotorymi morfologicheskimi svoystvami pochv // Pochvennye-kombinatsii i ikh genezis. – Moskva, 1972.
4. Burlakova L. M. Primenenie informatsionno-logicheskogo analiza v agronomii // Sovremennye metody issledovaniy v agronomii: sb. nauch. tr. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 1990. – S. 29-36.
5. Dospekhov, B. A. Metodika polevogo opyta: (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy) / B. A. Dospekhov. – 5-e izd., dop. i pererab. – Moskva: Agropromizdat, 1985. – 351 s.
6. Gefke, I., Zharkova, S. (2019). The effect of the sum of soil temperatures on the yield model of onion (*Allium cepa* L.) in the High Altai Priobye. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. 395. 012026. DOI: 10.1088/1755-1315/395/1/012026.
7. Pankova T. I., Masyutenko N. P., Koltysheva E. V. Vozmozhnosti modelirovaniya plodorodiya pochv na osnove informatsionno-logicheskogo analiza // Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. – 2018. – No. 4. – S. 8-16.
8. Shorina, I. V. Vliyanie ekspozitsii sklona na gidrotermicheskiy rezhim i teplovye svoystva chernozema v yshchelochennogo v usloviyakh Altayskogo Priobya / I. V. Shorina, S. V. Makarychev // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 1 (219). – S. 30-37. – DOI 10.53083/1996-4277-2023-219-1-30-37.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00198.

