

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

INTERDISCIPLINARY RESEARCH

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-1-1044

EDN: DJLXOS

УДК 536.7:631.42



Научная статья

ЭНЕРГОЭНТРОПИЙНЫЙ АНАЛИЗ
СВЕТЛО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВ*Г.А. Рулев, А.С. Рулев, О.В. Рулева***Аннотация**

Энтропия как процесс, изучаемый в природных явлениях, связана с термодинамикой. В частности, при изучении состояния почвы, наблюдается её изменение, проходящее через состояние равновесия. Равновесные состояния в окружающей среде связаны с максимумом полной энтропии.

Цель исследований – определение энергии, заключенной в почве, на различных уровнях в зависимости от фракционного состава частиц почвы на основе эмпирических и расчетных данных.

Новизна. Впервые для орошаемых светло-каштановых почв проведен энергоэнтропийный анализ, позволяющий определить остаточную энергию, запасенную в почве.

Материалы и методы. По полевым данным проведен анализ полного гранулометрического состава почвы с определением весового вклада каждой фракции. Для выделения минералогического состава почвы, использовали расчеты по результатам химического анализа. Наличие гумуса и растительных остатков определяли по общепринятой методике. Отбор образцов осуществлялся на территории п. Водный Волго-Донского междуречья.

Результаты исследований. В исследованиях представлены характеристики светло-каштановой тяжелосуглинистой почвы. Содержание физической глины в пахотном горизонте (2-25 см) – 45,2 %. Иллювиальные горизонты B_1 и B_2 по содержанию ила выражены четко. Преобладает илистая фракция 27,74 - 31,22 %. Термодинамические характеристики - энтальпия, энергия Гиббса и

энтропия не являются абсолютными величинами. Они представляют долю энергии, оставшейся в почве у конкретного минерала, или его свойство. Анализ термодинамических параметров показал, что в горизонте 2-25 см значения (ΔH , ΔG , ΔS) наибольшие в крупнопылеватой фракции, затем идет илистая фракция, мелко-, среднепылеватая и песок. На глубине 26-55 см по потенциально высоким термодинамическим параметрам по всем фракциям опережают крупно-пылеватая и илистая. На глубине 56-75 см сохраняется тенденция преобладания крупно-пылеватой и илистой фракции.

Заключение. Самые высокие показатели термодинамических потенциалов в горизонте 25-55 см: ΔH , кДж/моль; 1415,6, ΔG , кДж/моль - 1328,22; ΔS , Дж /моль•град - 66,85. Данный горизонт характеризуется максимальными значениями потенциальной относительной остаточной энергии. Самый низкий потенциал глубже 75 см. Энтропия с глубиной уменьшается, в горизонте 25-55 см она максимальна.

Ключевые слова: термодинамический потенциал; гранулометрический состав; энергоэнтропия; светло-каштановая почва; орошаемая агросистема

Для цитирования. Рулев, Г. А., Рулев, А. С., & Рулева, О. В. (2025). Энергоэнтропийный анализ светло-каштановых почв. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(1), 461-474. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1044>

Original article

ENERGY ENTROPY ANALYSIS OF LIGHT CHESTNUT SOILS

G.A. Rulev, A.S. Rulev, O.V. Ruleva

Abstract

Entropy as a process studied in natural phenomena is related to thermodynamics. In particular, when studying the state of the soil, its change is observed, passing through a state of equilibrium. Equilibrium states in the environment are associated with a maximum of total entropy.

The **purpose** of the research is to determine the energy contained in the soil at various levels depending on the fractional composition of soil particles based on empirical and calculated data.

Novelty. For the first time, an energy entropy analysis was performed for irrigated light chestnut soils, which makes it possible to determine the residual energy stored in the soil.

Materials and methods. According to field data, the analysis of the complete granulometric composition of the soil was carried out with the determination of the weight contribution of each fraction. Calculations based on the results of chemical analysis were used to isolate the mineralogical composition of the soil. The presence of humus and plant residues was determined by a generally accepted method. The sampling was carried out on the territory of the village. The waterway of the Volga-Don interfluvium.

Research results. The research presents the characteristics of light chestnut heavy loamy soil. The content of physical clay in the arable horizon (2-25 cm) is 45.2%. The illuvial horizons B1 and B2 are clearly expressed in terms of silt content. The silty fraction of 27.74 - 31.22% prevails. Thermodynamic characteristics enthalpy, Gibbs energy and entropy are not absolute values. They represent the proportion of energy remaining in the soil of a particular mineral, or its property. The analysis of thermodynamic parameters showed that in the horizon of 2-25 cm the values (ΔH , ΔG , ΔS) are greatest in the coarse-powdered fraction, followed by the silty fraction, fine-, medium-powdered and sand. At a depth of 26-55 cm, coarse-dusty and silty are ahead of all fractions in terms of potentially high thermodynamic parameters. At a depth of 56-75 cm, the tendency of the predominance of coarse-dusty and silty fractions persists.

Conclusion. The highest indicators of thermodynamic potentials in the horizon of 25-55 cm - ΔH kJ/mol—1415,6, - ΔG kJ/mol—1328,22, ΔS J/mol grad - 66.85. This horizon is characterized by the maximum values of the potential relative residual energy. The lowest potential is deeper than 75 cm. Entropy decreases with depth, in the horizon of 25-55 cm it is maximum.

Keywords: thermodynamic potential; granulometric composition; energy entropy; light chestnut soil; irrigated agricultural system

For citation. Rulev, G. A., Rulev, A. S., & Ruleva, O. V. (2025). Energy entropy analysis of light chestnut soils. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(1), 461–474. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1044>

Предшественниками [1] применялся при изучении процессов познания в открытых неравновесных орошаемых геосистемах энергоэнтропийный метод создания термодинамических моделей. Известно ограниченное число моделей, построенных таким образом. Примером является работа Э.Г. Палагина, в которой на основе термодинамики необратимых процессов выведена модель взаимосвязанного переноса тепла и влаги при замерзании – оттаивании почв. Нами предлагается подход к моделированию процессов в орошаемых агросистемах, основанный на следующей концепции: учитывается агрофитоценоз, состояние приземного слоя атмосферы или

деятельного слоя и минералогический состав почвы. В данной статье мы более подробно рассмотрим состояние почвы.

Методологическое обоснование энергоэнтропийного анализа почв появилось благодаря фундаментальным работам Волобуева В.Р. [1], Ковды В.А. [3], Назарова А.Г. [4]. Актуальность данного направления исследований состоит в возможности использования представлений об энергии, заключенной в почве, о термодинамических свойствах почв и субъектов, свободной энергии Гиббса и энтропии для оценки биоэнергетического потенциала почв [6; 10; 11].

В термодинамике почв широко используются термодинамические составляющие: внутренняя энергия U ; энтальпия (теплосодержание, тепловая функция) H ; свободная энергия Гиббса G ; энтропия S [6; 7].

Материалы и методы исследований

Методика термодинамических расчетов для почв включает бурение скважин для отбора почвенных образцов, определение гранулометрического состава в почвенно-аналитической лаборатории [1] и расчет термодинамических параметров. Мы использовали принятый в почвоведении Сибирцевым Н. М. и уточненный Качинским Н. А. метод определения почв по гранулометрическому составу, основанный на классификации по соотношению физической глины и физического песка.

Энергетические и термодинамические характеристики почв рассчитывались по формуле

$$M_k = P_o / M_o,$$

где M_k – молекулярное количество оксида, M_o – молекулярный вес оксида, P_o – содержание оксида в весовых процентах. Затем, умножаем мольную долю оксида на величину термодинамической константы. Значения термодинамических констант, встречающихся в почве, приведены в многочисленных химических и геохимических трудах и справочниках для стандартных условий $T = 298,15^\circ\text{K}$ (25°C). Применение этих данных для характеристики минералов почвы следует из аддитивных термодинамических потенциалов, путем простого суммирования потенциалов. Получаем в итоге значение потенциалов сложных минеральных систем с учетом их молекулярного количества. Сумму величин свободной энергии Гиббса ($-\Delta G$), энтальпии ($-\Delta H$) и энтропии (S) каждой фракции частиц почв, выживших оксид минералов, дает общую картину для почв.

Отбор образцов осуществлялся на территории п. Водный Волго-Донского междуречья в Советском районе г. Волгограда в течение 2018-2022 гг. Координаты объекта $48^\circ 35' 30''$ с.ш., $44^\circ 20' 20''$ в.д.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены характеристики светло-каштановой почвы, полученные расчетным путем. Согласно данным по гранулометрическому составу, почва характеризуется как тяжелосуглинистая. Содержание физической глины в пахотном горизонте (2-25 см) – 45,2 %. Иллювиальные горизонты В₁ и В₂ по содержанию ила выражены четко. Преобладает илистая фракция 27,74 - 31,22 %, облегчение гран состава не наблюдается (табл.1).

Таблица 1.

Гранулометрический состав светло-каштановых слабосолонцеватых тяжелосуглинистых почв (разрез 1)

Горизонт, глубина, см	Гран состав, %, размер частиц, мм					
	<0,001	0,001-0,005	0,01-0,005	0,01-0,05	0,05-0,25	0,25-1
A, 2-25	27,74	10,60	6,90	40,42	12,20	0,20
B, 26-35	31,22	8,25	5,90	35,50	8,28	0,09
B, 36-55	25,48	6,18	4,98	36,30	8,18	0,35
C, 56-75	24,80	5,79	4,96	37,21	8,71	0,05

По всем фракциям данной почвы показатели очень разнятся по своим максимумам и минимумам. Внутри фракций сами показатели не однородны. Можно выделить наиболее потенциальные запасы остаточной энергии.

В таблице 2 представлена характеристика термодинамических показателей по глубинам в профиле 2-75 см и по фракциям гранулометрического состава. Диапазон значений энтальпии (-ΔН) варьирует от -0,75 во фракции 0,25-1 мм до -590,6 – 0,01-0,05 мм. Значение свободной энергии Гиббса варьирует от 0,71 во фракции 0,25-1 мм до 554,03 во фракции 0,01-0,05 мм. Энтропия составляет 0,03- 0,25-1 мм минимум и максимум 28,12 во фракции 0,01-0,05 мм.

Таблица 2.

Термодинамическая характеристика светло-каштановых слабосолонцеватых тяжелосуглинистых почв

Фракции размер частиц, мм	Горизонт, глубина, см	ΔН кДж/моль	ΔGкДж/мол	ΔSДж/моль град
<0,001	A, 2-25	-383,91	-360,64	17,72
	B, 26-35	-432,46	-406,33	19,87
	B, 36-55	-353,56	-332,12	16,19
	C, 56-75	-343,70	-322,80	15,75

0,001-0,005	A ₁ 2-25	-149,81	-140,51	7,15
	B ₁ 26-35	-117,82	-110,47	5,62
	B ₂ 36-55	-89,05	-83,50	4,25
	C ₁ 56-75	-83,51	-78,29	3,99
0,005-0,01	A ₁ 2-25	-101,39	-95,07	4,85
	B ₁ 26-35	-87,18	-81,75	4,16
	B ₂ 36-55	-72,53	-68,01	3,46
	C ₁ 56-75	-72,50	-68,00	3,44
0,01-0,05	A ₁ 2-25	-590,60	-554,03	28,12
	B ₁ 26-35	-520,05	-487,99	24,64
	B ₂ 36-55	-528,97	-496,50	24,72
	C ₁ 56-75	-548,61	-515,08	25,77
0,05-0,25	A ₁ 2-25	-182,66	-171,66	8,51
	B ₁ 26-35	-123,66	-116,22	5,75
	B ₂ 36-55	-122,09	-114,75	5,68
	C ₁ 56-75	-130,41	-122,57	6,06
0,25-1	A ₁ 2-25	-3,09	-2,91	0,14
	B ₁ 26-35	-1,36	-1,28	0,06
	B ₂ 36-55	-5,27	-4,96	0,24
	C ₁ 56-75	-0,75	-0,71	0,03

Анализ термодинамических параметров по фракциям светло-каштановой почвы показал, что в горизонте 2-25 см (табл.3,4,5) значения (ΔH , ΔG , ΔS) наибольшие во фракции 0,01-0,05 (крупнопылеватая), затем идет илистая фракция, мелко- и среднепылеватая фракция и песок.

Таблица 3.

Термодинамические параметры илистой фракции по горизонтам

Фракция	Горизонт, глубина, см	$\sum \Delta H$ кДж/моль	$\sum \Delta G$ кДж/моль	$\sum \Delta S$ Дж./моль град.
Илистая	A ₁ 2-25	-383,91	-360,64	17,72
	B ₁ 26-35	-432,46	-406,33	19,87
	B ₂ 36-55	-353,56	-332,12	16,19
	C ₁ 56-75	-343,70	-322,80	15,75
Сумма		-1513,63	-1830,03	69,53

Таблица 4.

Термодинамические параметры пылеватой фракции по горизонтам

Фракция	Горизонт, глубина, см	$\sum \Delta H$ кДж/моль	$\sum \Delta G$ кДж/моль	$\sum \Delta S$ Дж./моль град.
Пылеватая	A, 2-25	-841,80	-789,61	40,12
	B, 26-35	-725,05	-680,21	34,43
	B, 36-55	-690,55	-648,01	32,42
	C, 56-75	-704,62	-661,37	33,20
Сумма		-2962,02	-2779,20	140,16

Таблица 5.

Термодинамические параметры фракции песок по горизонтам

Фракция	Горизонт, глубина, см	$\sum \Delta H$ кДж/моль	$\sum \Delta G$ кДж/моль	$\sum \Delta S$ Дж./моль град.
Песок	A, 2-25	-185,75	-174,57	8,65
	B, 26-35	-125,02	-117,50	5,81
	B, 36-55	-127,36	-119,70	5,92
	C, 56-75	-131,17	-123,27	6,10
Сумма		-569,30	-535,05	26,48

На глубине 26-55 см по всем фракциям опережают крупно-пылеватая и илистая фракции по потенциально высоким термодинамическим параметрам.

На глубине 56-75 см сохраняется тенденция преобладания крупно-пылеватой и илистой фракции по термодинамическим параметрам.

Термодинамические характеристики энтальпии, энергии Гиббса и энтропии не являются абсолютными величинами. Они представляют долю энергии, оставшейся в почве у конкретного минерала или его свойство, оставшееся после преобразований, например, эрозия почвы, антропогенная нагрузка. Энтропия представляет связанную энергию тепла, необходимого для приведения системы из кристаллического состояния при абсолютном нуле. Отрицательный знак $-\Delta G$ у энергии Гиббса показывает энергетический «запас» энергии, аккумулированной в почве. В силу суммирования физических классов частиц (песчаных, пылеватых и физической глины) при расчете ΔH , ΔG , ΔS с учетом наиболее распространенных частиц они объединяются функцией относительной распространенности, представленных ниже [4; 12; 15]:

$$H = \sum (-H) > 0.1 + \sum (-H) 0.1 - 0.01 + \sum (-H) < 0.01$$

$$(-G) = \sum (-G) > 0.1 + \sum (-G) 0.1 - 0.01 + \sum (-G) < 0.01$$

$$S = \sum S > 0.1 + \sum S 0.1 - 0.01 + \sum S < 0.01;$$

Рассчитанная выше сумма по трем фракциям частиц почвы, таблица (3,4,5), позволяет высчитать энтропийный (Π_s) и энергетические показатели (Π_G) (Π_H), которые определяют термодинамическую устремленность к разрушению почвенного покрова, связанную с ирригационной эрозией, различными видами антропогенных воздействий или к синтезу новообразований.

Таблица 6.

Распределение сумм термодинамических показателей по фракциям на глубине 2-75 см горизонтов A_1C_1

Фракции	$\Sigma \Delta H$ кДж/моль	$\Sigma \Delta G$ кДж/моль	$\Sigma \Delta S$ Дж./моль град.
Илистая	-1513,63	-1421,89	69,53
Пылеватая	-2962,02	-2779,20	140,16
Песок	-569,30	-535,05	26,48

$$(\Pi_s) = \frac{\Sigma S > 0.1}{\Sigma S < 0.01}; \Pi_G = \frac{(-G) > 0.1}{(-G) < 0.01}; (\Pi_H) = \frac{(-H) > 0.1}{(-H) < 0.01}$$

Экстенсивные термодинамические показатели свойств почв, выражают относительный энергоэнтропийный вклад групп дисперсности фаз (илистая, пылеватая, песок) в общую энергоемкость орошаемой агросистемы.

Приведем наши показатели по термодинамической направленности светло-каштановых почв (таблица 6).

Показатель, определяющий термодинамическую направленность к деструкции или к синтезу новообразований:

Соотношение мелкодисперсной фракции к крупно дисперсной фракции.

$\Pi_{\Delta H}$	-569,30	/	-4475,65	-0,1272
$\Pi_{\Delta G}$	-535,05	/	-4201,09	-0,1273
$\Pi_{\Delta S}$	26,48	/	209,69	-0,1263

Энергетические и энтропийные свойства, определяющие термодинамическую устремленность к разрушению почвенного покрова и новообразованию, не выявили существенно резких изменений показателя деструкции или новообразований в данной почве. Энтропийный показатель (Π_s) и энергетический (Π_G) (Π_H) равен 0,1.

Заключение

Рассчитаны суммы термодинамических потенциалов всех фракций. Самые высокие показатели в горизонте 25-55см ΔH кДж/моль-1415,6 ΔG кДж/мол-1328,22, ΔS Дж /моль град 66,85. Данный горизонт характеризуется наиболее лучшими и максимальными значениями потенциальной

относительной остаточной энергии. Самый низкий потенциал глубже 75см его показатели ниже всех. Энтропия с глубиной уменьшается. Только в горизонте 25-55см она максимальна.

Такая тенденция у энергии Гиббса и Энтальпии. В остальных горизонтах термодинамические величины плавно уменьшаются. В светло-каштановой солонцеватой почве по термодинамическим параметрам преобладает крупно-пылеватая фракция, далее следует илистая, а затем песок.

Энтропийный и энергетические показатели, определяющие термодинамическую деструкцию и новообразования, не выявили существенных резких изменений. Энтропийный показатель (P_s) и энергетический (P_G) (P_H) равен 0,1 единице.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Волобуев, В. Р., & Пономарев, Д. Г. (1977). Некоторые термодинамические характеристики минеральных ассоциаций почв. *Почвоведение*, (1), 3–13.
2. Воронин, А. Д., & Максимова, А. С. (1972). Математический и химический состав фракций механических элементов почв темно-каштановой подзоны. *Почвоведение*, (8), 112–120.
3. Ковда, А. В. (1973). *Основы учения о почвах. Общая теория общеобразовательного процесса*. Москва: Наука. С. 127–148.
4. Назаров, А. Г. (2004). Термодинамическая направленность почвообразования в истории развития экосистем. В книге: *Почвы, биогеохимические циклы и биосфера* (с. 70–102). Москва: Товарищество научных изданий КМК.
5. Палагин, Э. Г. (1981). *Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур*. Ленинград: Гидрометеониздат. 191 с.
6. Яковенко, И. М. (2016). Пространственная структура туристско-рекреационного освоения Крыма: эволюция и перспективы. *Учёные записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология*, 2(68), (3), 180–192.
7. Рулев, А. С., Рулев, Г. А., & Рулева, О. В. (2021). Геотопологическое обоснование создания куртинных насаждений. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(4), 131–143. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-4-131-143>
8. Bai, B., Yang, G.-C., Li, T., & Yang, G.-S. (2019). A thermodynamic constitutive model with temperature effect based on particle rearrangement for geo-

- materials. *Mechanics of Materials*, 139(3), 103180. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103180>
9. Ben-Noah, I., & Friedman, S. P. (2018). Review and evaluation of root respiration and of natural and agricultural processes of soil aeration. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1–23. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.06.0119>
 10. Rulev, A. S., Ruleva, O. V., Rulev, G. A., & Tanyukevich, V. V. (2021). Landscape and forest reclamation approach to assessing the state of protective forest plantings. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(5), 321–335. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-5-321-325>
 11. Ruleva, O. V., Rulev, G. A., & Rulev, A. S. (2020). Woodlands as a tool for actively managing the microclimate of agrophytocoenoses. *International Journal of Pharmaceutical Research*, 12(4), 3447–3453. <https://doi.org/10.31838/ijpr/2020.12.04.472>
 12. Smagin, A. V. (2018). About thermodynamic theory of water retention capacity and dispersity of soils. *European Soil Science*, 51, 782–796. <https://doi.org/10.1134/S1064229318070098>
 13. Smagin, A. V. (2016). Thermogravimetric determination of specific surface area for soil colloids. *Colloid Journal*, 78, 391–396. <https://doi.org/10.1134/S1061933X16030170>
 14. Wiesner, S., Starr, G., & Cherry, J. A. (2020). Forest structure and composition drive differences in metabolic energy and entropy dynamics during temperature extremes in longleaf pine savannas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 297, 108252. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108252>
 15. Wu, X., Wei, Y., Cai, C., Yuan, Z., Li, D., Liao, Y., & Deng, Y. (2021). Quantifying the contribution of phyllosilicate mineralogy to aggregate stability in the East Asian monsoon region. *Geoderma*, 393(1), 115036. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115036>
 16. Yang, G., & Bai, B. (2019). Thermo-hydro-mechanical model for unsaturated clay soils based on granular solid hydrodynamics theory. *International Journal of Geomechanics*, 19(10), 04019115. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001498](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001498)
 17. Zarifi, M., Kvamme, B., & Kuznetsova, T. (2021). Modeling of heat transfer in hydrate-filled sediment systems using residual thermodynamics and classical nucleation theory. *Applied Sciences*, 11(9), 4124. <https://doi.org/10.3390/app11094124>
 18. Zhang, Z., & Cheng, X. (2017). A fully coupled THM model based on nonequilibrium. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 41(4), 527–554. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32492-5_18

19. Duan, M. X., & Jin, M. X. (2019). Modeling water and heat transfer in soil-plant-atmosphere continuum applied to maize growth under plastic film mulching. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 6(2), 144–161. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019258>
20. Zhang, Z. (2017). A thermodynamic-based theory for thermo-poromechanical modeling of saturated clays. *International Journal of Plasticity*, 92(1–2), 164–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.03.007>

References

1. Volobuev, V. R., & Ponomarev, D. G. (1977). Some thermodynamic characteristics of mineral associations of soils. *Soil Science*, (1), 3–13.
2. Voronin, A. D., & Maksimova, A. S. (1972). Mathematical and chemical composition of mechanical fractions of soils in the dark chestnut subzone. *Soil Science*, (8), 112–120.
3. Kovda, A. V. (1973). *Fundamentals of soil studies. General theory of the educational process*. Moscow: Nauka. Pp. 127–148.
4. Nazarov, A. G. (2004). Thermodynamic direction of soil formation in the history of ecosystem development. In *Soils, biogeochemical cycles and biosphere* (pp. 70–102). Moscow: Товарищество научных изданий КМК.
5. Palagin, E. G. (1981). *Mathematical modeling of agrometeorological conditions for winter survival of winter crops*. Leningrad: Gidrometeoizdat. 191 p.
6. Yakovenko, I. M. (2016). Spatial structure of tourist-recreational development of Crimea: evolution and prospects. *Scientific Notes of Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 2(68)(3), 180–192.
7. Rulev, A. S., Rulev, G. A., & Ruleva, O. V. (2021). Geotopological justification for creation of curtailed plantings. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(4), 131–143. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-4-131-143>
8. Bai, B., Yang, G.-C., Li, T., & Yang, G.-S. (2019). A thermodynamic constitutive model with temperature effect based on particle rearrangement for geomaterials. *Mechanics of Materials*, 139(3), 103180. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103180>
9. Ben-Noah, I., & Friedman, S. P. (2018). Review and evaluation of root respiration and of natural and agricultural processes of soil aeration. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1–23. <https://doi.org/10.2136/vzj2017.06.0119>
10. Rulev, A. S., Ruleva, O. V., Rulev, G. A., & Tanyukevich, V. V. (2021). Landscape and forest reclamation approach to assessing the state of protective forest plantings. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 13(5), 321–335. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2021-13-5-321-325>

11. Ruleva, O. V., Rulev, G. A., & Rulev, A. S. (2020). Woodlands as a tool for actively managing the microclimate of agrophytocoenoses. *International Journal of Pharmaceutical Research*, 12(4), 3447–3453. <https://doi.org/10.31838/ijpr/2020.12.04.472>
12. Smagin, A. V. (2018). About thermodynamic theory of water retention capacity and dispersity of soils. *European Soil Science*, 51, 782–796. <https://doi.org/10.1134/S1064229318070098>
13. Smagin, A. V. (2016). Thermogravimetric determination of specific surface area for soil colloids. *Colloid Journal*, 78, 391–396. <https://doi.org/10.1134/S1061933X16030170>
14. Wiesner, S., Starr, G., & Cherry, J. A. (2020). Forest structure and composition drive differences in metabolic energy and entropy dynamics during temperature extremes in longleaf pine savannas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 297, 108252. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108252>
15. Wu, X., Wei, Y., Cai, C., Yuan, Z., Li, D., Liao, Y., & Deng, Y. (2021). Quantifying the contribution of phyllosilicate mineralogy to aggregate stability in the East Asian monsoon region. *Geoderma*, 393(1), 115036. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115036>
16. Yang, G., & Bai, B. (2019). Thermo-hydro-mechanical model for unsaturated clay soils based on granular solid hydrodynamics theory. *International Journal of Geomechanics*, 19(10), 04019115. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001498](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001498)
17. Zarifi, M., Kvamme, B., & Kuznetsova, T. (2021). Modeling of heat transfer in hydrate-filled sediment systems using residual thermodynamics and classical nucleation theory. *Applied Sciences*, 11(9), 4124. <https://doi.org/10.3390/app11094124>
18. Zhang, Z., & Cheng, X. (2017). A fully coupled THM model based on nonequilibrium. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 41(4), 527–554. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32492-5_18
19. Duan, M. X., & Jin, M. X. (2019). Modeling water and heat transfer in soil-plant-atmosphere continuum applied to maize growth under plastic film mulching. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 6(2), 144–161. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019258>
20. Zhang, Z. (2017). A thermodynamic-based theory for thermo-poromechanical modeling of saturated clays. *International Journal of Plasticity*, 92(1–2), 164–185. <https://doi.org/10.1016/j.iplas.2017.03.007>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Рулев Глеб Александрович, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник отдела орошаемого земледелия и агроэкологии

Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия - Филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»

*ул. им. Тимирязева, 9, г. Волгоград, 400002, Российская Федерация
g.heroes@yandex.ru*

Рулев Александр Сергеевич, академик РАН, Лауреат Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, доктор сельскохозяйственных наук главный научный сотрудник

Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия - Филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»

*ул. им. Тимирязева, 9, г. Волгоград, 400002, Российская Федерация
AS_Rulev@vniioz.ru*

Рулева Ольга Васильевна, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела оросительных мелиораций, и.о. зав. лабораторией моделирования продукционных процессов

Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия - Филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»

*ул. им. Тимирязева, 9, г. Волгоград, 400002, Российская Федерация
ov_ruleva@vniioz.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Gleb A. Rulev, Cand. Sc. (Agriculture), Researcher, Senior Researcher of the Department of Irrigated Agriculture and Agroecology
Federal State Budget Scientific Institution the All-Russian Research In-

stitute of Irrigated Agriculture
9, Timiryazev Str., Volgograd, 400062, Russian Federation
g.heroes@yandex.ru
SPIN-code: 4975-7230
ResearcherID: X-8997-2018
Scopus Author ID: 57222153846

Alexander S. Rulev, Academician of the Russian Academy of Sciences, Laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation in the Field of Science and Technology, Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher of the Department of Irrigated Agriculture and Agroecology
Federal State Budget Scientific Institution the All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture
9, Timiryazev Str., Volgograd, 400062, Russian Federation
AS_Rulev@vniioz.ru
SPIN-code: 4975-7230
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6152-288X>
ResearcherID: E-6770-2014
Scopus Author ID: 57190982345

Olga V. Ruleva, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of Irrigation Land Reclamation Department, Acting Head of the Laboratory of Productive Processes Modeling
Federal State Budget Scientific Institution the All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture
9, Timiryazev Str., Volgograd, 400062, Russian Federation
ov_ruleva@vniioz.ru
SPIN-code: 4975-7230
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7343-4227>
ResearcherID: B-5269-2017
Scopus Author ID: 57220645923

Поступила 15.05.2024
После рецензирования 05.07.2024
Принята 07.08.2024

Received 15.05.2024
Revised 05.07.2024
Accepted 07.08.2024