

УДК 631.43

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (биологические науки, сельскохозяйственные науки)

**ИНТЕГРАЦИЯ ЗАКОНОВ
ТЕРМОДИНАМИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА И
МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ
СОЛЕВОГО ОБМЕНА В ПОЧВЕННОЙ
СРЕДЕ: РОЛЬ ЭНТРОПИИ В
ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОЧВЕННОЙ
ДЕГРАДАЦИИ**

Аврахам Елена Михайловна
канд. физико-математических наук
av.el3@yandex.com
*ФГБОУ ВО Кубанский государственный
аграрный университет имени И.Т. Трубилина,
Краснодар, Россия*

В статье представлена математическая модель оценки влияния термодинамической энтропии на процессы развития засоления почв. Исследование основано на интеграции законов термодинамики для анализа и моделирования механизмов солевого обмена в почвенной среде. Описаны основные параметры модели, включая энергетические характеристики почвы, динамику влаго- и сольтранспорта, а также их взаимодействие под воздействием внешних факторов. Проведена верификация модели, которая включала в себя теоретическую верификацию, а так же верификацию на основании анализа спутниковых данных высокого разрешения, что позволило подтвердить её адекватность в описании ключевых закономерностей процесса засоления. Результаты демонстрируют, что снижение энтропии указывает на развитие процессов накопления солей в корнеобитаемом слое, что имеет важное значение для прогнозирования деградации земель и разработки мер по их восстановлению

Ключевые слова: ЗАСОЛЕНИЕ ПОЧВ, ПОЧВЕННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ, СОЛЕВОЙ ОБМЕН, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭНТРОПИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ, УПРАВЛЕНИЕ ПОЧВАМИ, ЭНТРОПИЯ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-207-043>

UDC 631.43

4.1.3. Agrochemistry, agro-soil science, plant protection and quarantine (biological sciences, agricultural sciences)

**INTEGRATION OF THERMODYNAMIC
LAWS FOR ANALYSIS AND MODELING OF
MECHANISMS OF SALT EXCHANGE IN THE
SOIL ENVIRONMENT: THE ROLE OF
ENTROPY IN FORECASTING SOIL
DEGRADATION**

Avrakham Elena Mikhailovna
Candidate of Physical and Mathematical Sciences
av.el3@yandex.com
*Kuban State Agrarian University named after I.T.
Trubilin, Krasnodar, Russia*

The article presents a mathematical model for assessing the influence of thermodynamic entropy on the processes of soil salinization development. The study is based on the integration of the laws of thermodynamics for the analysis and modeling of salt exchange mechanisms in the soil environment. The main parameters of the model are described, including the energy characteristics of the soil, the dynamics of moisture and salt transport, as well as their interaction under the influence of external factors. The model was verified, which included theoretical verification, as well as verification based on the analysis of high-resolution satellite data, which confirmed its adequacy in describing the key patterns of the salinization process. The results demonstrate that a decrease in entropy indicates the development of salt accumulation processes in the root zone, which is important for predicting land degradation and developing measures for their restoration

Keywords: SOIL SALINIZATION, SOIL DEGRADATION, SALT METABOLISM, THERMODYNAMIC ENTROPY, MATHEMATICAL MODEL, PROCESS MODELING, SATELLITE DATA, SOIL MANAGEMENT, ENTROPY

Введение.

Ставропольский край — один из ведущих аграрных регионов России, характеризующийся интенсивным использованием земельных ресурсов. В структуре сельскохозяйственных угодий наибольшую площадь занимают пашни – 69,5%, кормовые угодья составляют 29,8% [1].

Однако засоление почв остается значимой экологической и сельскохозяйственной проблемой [2], что связано с рядом факторов: Особенности климата: засушливость, неравномерное распределение осадков способствуют накоплению солей в почвенном профиле. Глобальное изменение климата: повышение температуры, увеличение частоты засух усиливают процессы засоления, влияя на водный баланс почвы. Ирригационная деятельность [3]: избыточное или некорректное орошение без учета дренажа приводит к повышению уровня грунтовых вод и вторичному засолению.

Обоснование актуальности исследования и обозначение проблемы.

Проблема засоления в регионе ставит под угрозу продуктивность сельскохозяйственных земель, снижает их экологическую устойчивость и экономическую ценность.

В рамках исследования мы анализируем связь между термодинамической энтропией почвы и развитием процессов засоления. Для исследования пространственно-временной динамики развития засоления почвы выбрана часть территории (общей площадью 10 км²) Ставропольского края с негативной динамикой развития засоления.

Постановка задачи и методика решения.

Для анализа процессов засоления почв под воздействием термодинамической энтропии были использованы данные дистанционного зондирования Земли, предоставляемые платформой Google Earth Engine. В расчётах применены следующие коллекции спутниковых данных: NASA/SMAP/SPL4SMGP/007 [4] — эта коллекция предоставляет данные, необходимые для анализа потоков длинноволнового излучения, водного баланса, влажности почвы и параметров поверхности. MODIS/061/MCD43A4 — используется для оценки альbedo почвенной поверхности. MODIS/061/MOD11A1 — данные этой коллекции позволяют рассчитывать температуру поверхности земли и эмиссивность почвы.

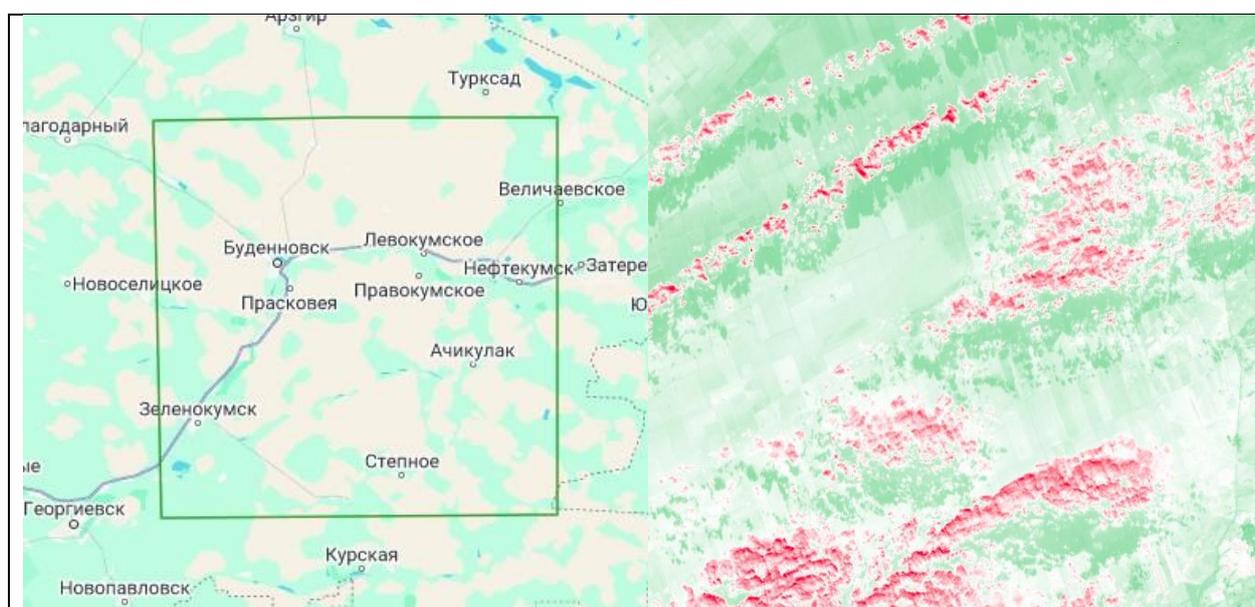


Рисунок 1 – География области исследования. Карта засоления области исследования согласно индексу засоления

Фильтрация по пространственным и временным параметрам: выделение данных для заданной точки и временного интервала (2015–2025 гг.). Расчет временных рядов: использование функций платформы Google Earth Engine для построения временных рядов характеристик почвы, таких как альbedo, эмиссивность и потоки излучения. Масштабирование данных: приведение спутниковых показателей к реальным значениям для интерпретации. Экспорт данных: результаты анализа экспортировались в

формате “csv” для дальнейшей обработки и интеграции с математической моделью.

Энтропия определяется через соотношение между изменением тепловой энергии системы и температурой, при которой происходит это изменение. Дифференциальная форма выражения для изменения энтропии имеет вид [5]:

$$dS = \frac{\delta Q}{T},$$

где δQ — элементарное количество переданной энергии (Дж), а T — абсолютная температура (К).

Для открытой системы, такой как поверхность почвы, полное изменение энтропии может быть рассчитано как:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q_{\text{net}}}{T},$$

$\delta Q_{\text{net}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}$ — разность между входящим (Q_{in}) и исходящим (Q_{out}) тепловыми потоками.

Коротковолновый поток энергии, поглощаемый поверхностью почвы, рассчитывается с учетом альбедо (α) почвы:

$$Q_1 = F_1 \cdot (1 - \alpha),$$

где F_1 — плотность потока падающего коротковолнового излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2$), α — альбедо (доля отраженного света).

Длинноволновая радиация, поглощаемая почвой, представлена потоком:

$$Q_2 = F_2,$$

где F_2 — плотность потока поглощенной длинноволновой радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Согласно закону Стефана-Больцмана, энергия длинноволнового излучения почвы определяется выражением:

$$Q_3 = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{surface}}^4$$

где ϵ — эмиссивность почвы, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) — постоянная Стефана-Больцмана, T_{surface} — температура поверхности почвы (К).

Поток энергии, передаваемый из поверхностного слоя вглубь почвы:

$$Q_4 = F_{\text{ground_heat}}$$

где $F_{\text{ground_heat}}$ — плотность потока тепла вглубь почвы (Вт/м²).

Потери тепла на испарение влаги из почвы рассчитываются по формуле:

$$Q_5 = L_v \cdot E,$$

где $L_v \approx 2.45 \cdot 10^6$ Дж/кг, — скрытая теплота испарения воды, E — масса испарившейся воды за единицу времени (кг/м²).

Конвективный поток тепла в атмосферу определяется через плотность потока:

$$Q_6 = F_{\text{sensible_heat}}$$

где $F_{\text{sensible_heat}}$ — плотность потока явного тепла (Вт/м²).

Общий входящий поток энергии:

$$Q_{\text{in}} = Q_1 + Q_2.$$

Общий исходящий поток энергии:

$$Q_{\text{out}} = Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6.$$

Методы и результаты исследования



Рисунок 2 – Изменение термодинамической энтропии почвы

Для оценки взаимосвязи между засолением почвы и термодинамической энтропией почвы было выполнено несколько этапов анализа, включая расчет коэффициента корреляции, применение теста Грейнгера для проверки причинности, а также построение графиков временных рядов.

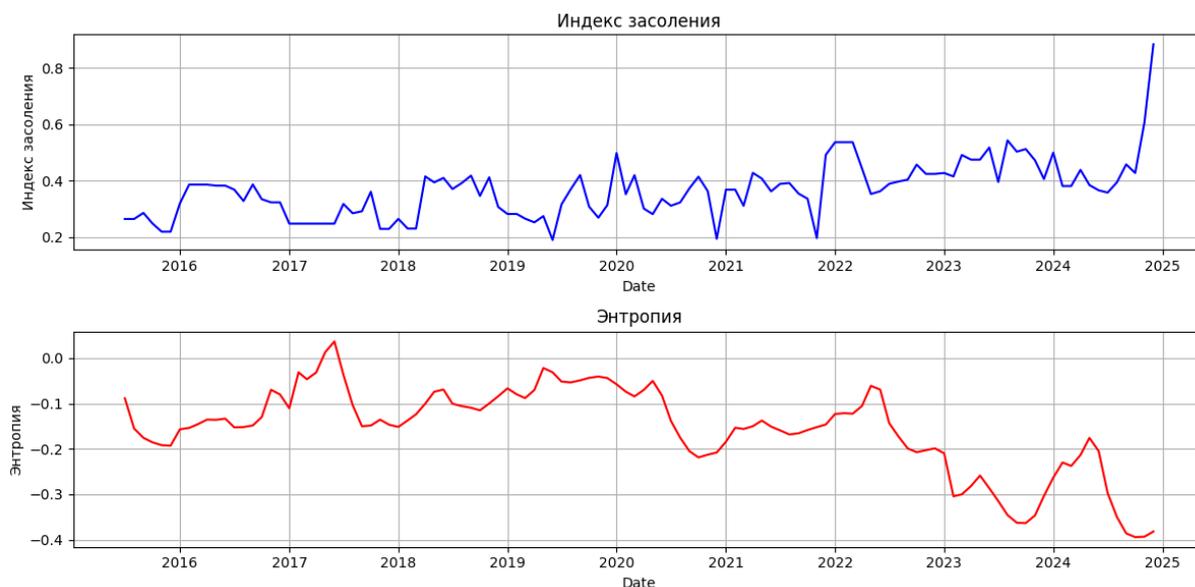


Рисунок 3 – Графики временной динамики индекса засоления и энтропии почвы

Для оценки линейной связи между засолением почвы и термодинамической энтропией почвы был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона [6], который является стандартным методом для оценки силы и направления линейной зависимости между двумя переменными. Значение коэффициента корреляции составляет -0.5633 , что указывает на наличие умеренной отрицательной корреляции между засолением почвы и термодинамической энтропией.

Для исследования направленности причинных связей между переменными был применен тест Грейнгера [7]. Этот тест позволяет проверить, оказывает ли предшествующая информация по одной переменной влияние на текущие значения другой переменной.

Формула расчета теста Грейнгера:

$$Y_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \beta_i Y_{t-i} + \sum_{i=1}^q \gamma_i X_{t-i} + \epsilon_t,$$

где Y_t — зависимая переменная, X_t — независимая переменная, p и q — количество лагов, ϵ_t — ошибка модели.

Результаты теста Грейнгера подтверждают, что изменение энтропии может быть причиной изменений засоленности почвы.

Заключение.

Результаты проведенного анализа показывают, что существует умеренная отрицательная корреляция между засолением почвы и термодинамической энтропией. Дополнительный анализ с использованием теста Грейнгера подтверждает наличие причинной связи между этими переменными, где термодинамическая энтропия оказывает влияние на уровень засоления почвы с задержкой, которая может варьироваться от одного до нескольких временных шагов.

Эти результаты могут быть полезны для дальнейших исследований, направленных на понимание термодинамических процессов в экосистемах и их взаимосвязи с изменениями в почвенной среде.

Список использованных источников

1. Есаулко А. Н., Гречишкина Ю. А., Подколзин О. А. Изменение агрохимических показателей чернозема выщелоченного под влиянием оптимизации систем удобрений в севообороте // Проблемы агрохимии и экологии. 2009. №1. С. 3–7.
2. Цховребов В. С., Новиков А. А., Калугин Д. В. Основные экологические проблемы почв Ставропольского края // Науки о земле. Наука. Инновации. Технологии. — 2014. — № 4. — С. 631.95(470.630).
3. Зайдельман Ф. Р., Давыдова И. О. Причины ухудшения химических и физических свойств черноземов при орошении неминерализованными водами // Почвоведение. 1989. №11. С. 101–108.
4. Reichle, R.H., G. De Lannoy, R.D. Koster, W.T. Crow, J.S. Kimball, Q. Liu, and M. Bechtold. 2022. SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 7. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. [doi:10.5067/LWJ6TF5SZRG3](https://doi.org/10.5067/LWJ6TF5SZRG3)
5. Callen, H. B. (1985). Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics (2nd ed.). Wiley.

6. Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240–242. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>

7. Granger, C. W. J. (1969). "Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods." *Econometrica*, 37(3), 424–438. DOI: 10.2307/1912791.

References

1. Esaulko A. N., Grechishkina Ju. A., Podkolzin O. A. *Izmenenie agro himicheskikh pokazatelej chernozema vyshhelochennogo pod vlijaniem optimizacii sistem udobrenij v sevooborote // Problemy agrohimii i jekologii*. 2009. №1. S. 3–7.

2. Chovrebov V. S., Novikov A. A., Kalugin D. V. *Osnovnye jekologicheskie problemy pochv Stavropol'skogo kraja // Nauki o zemle. Nauka. Innovacii. Tehnologii*. — 2014. — № 4. — S. 631.95(470.630).

3. Zajdel'man F. R., Davydova I. O. *Prichiny uhudshenija himicheskikh i fizicheskikh svojstv chernozemov pri oroshenii neminerallymi zovannymi vodami // Pochvovedenie*. 1989. №11. S. 101–108.

4. Reichle, R.H., G. De Lannoy, R.D. Koster, W.T. Crow, J.S. Kimball, Q. Liu, and M. Bechtold. 2022. SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 7. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi:10.5067/LWJ6TF5SZRG3

5. Callen, H. B. (1985). *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics* (2nd ed.). Wiley.

6. Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240–242. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>

7. Granger, C. W. J. (1969). "Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods." *Econometrica*, 37(3), 424–438. DOI: 10.2307/1912791.