



## ТРИБУНА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

УДК 528.87; 631.559

С.С. Алиева

### РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО КОМБИНИРОВАННОГО ИНДЕКСА ЗАСУХИ И ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

S.S. Aliyeva

#### THE DEVELOPMENT OF THE UNIVERSAL COMBINED INDEX OF THE DROUGHT AND HUMIDITY OF THE SOIL

**Алиева С.С.** – асп. Института космических исследований природных ресурсов Национального аэрокосмического агентства Азербайджана, г. Баку. E-mail: sevdaaliyeva06.01@gmail.com

**Aliyeva S.S.** – Post-Graduate Student, Institute of Space Researches of Natural Resources, National Space Agency of Azerbaijan, Baku. E-mail: sevdaaliyeva06.01@gmail.com

Засуха как природное явление является следствием отсутствия осадков и водоснабжения земель. Существующие индексы засухи характеризуют количественную оценку степени засушливости земель путем использования данных об осадках и эвапотранспирации. Однако большинство спектральных объектных индексов не обладает свойством интерактивности, т.е. в них отсутствует специальный управляемый параметр, при изменении которого состояние исследуемого объекта могло бы быть определено по изменению значения индекса. В статье рассматриваются вопросы разработки относительно простого универсального индекса засухи и влажности почвы, обладающего интерактивным свойством. Согласно результатам экспериментальных исследований динамики временного изменения NDVI и LST, характер корреляционной связи между NDVI и LST претерпевает качественное изменение при переходе от влажного состояния почвы к состоянию засухи. Если вода является лимитирующим фактором, определяющим рост растений, что типично для низких широт и середины сезона роста растений, то корреляция между LST и NDVI отрицательная. Однако, если лимитирующим фактором роста растений является солнечная энергия, что типично для высоких широт

и начала сезона роста растений, то корреляция между LST и NDVI положительная. Рассматриваемый индекс формулируется как скалярная свертка NDVI и LST с нормированными весовыми коэффициентами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Предлагаемый способ повышения надежности применения индекса TCIM в зонах отрицательной корреляции между LST и NDVI заключается в следующем. Если варьирование  $\alpha_1$  сопровождается соответствующим изменением экстремума рассматриваемого индекса то выносится суждение о присутствии лимитирующего развития растительности фактора, каковым является влага. Если варьирование  $\alpha_1$  не приводит к изменению величины экстремума рассматриваемого индекса, то выносится суждение об отсутствии недостатка влаги, т.е. лимитирующим фактором в данном случае оказывается солнечная энергия.

**Ключевые слова:** индекс засухи, оптимизация, корреляция, растения, влага.

The drought as natural phenomenon is the consequence of the lack of rainfall and water supply of lands. The existing indexes of the drought characterize quantitative assessment of dryness degree of lands by use of the data on rainfall and evapotranspiration. However, the majority of spectral object

*indexes do not possess the property of interactivity, i.e. in they don't have special operated parameter at which the change of condition of the studied object could be determined by change of value of the index. In present study the questions of development of rather simple universal index of the drought of humidity of the soil possessing interactive property are considered. According to the results of pilot studies of dynamics of temporary change of NDVI and LST, the nature of correlation communication between NDVI and LST undergoes high-quality change upon the transition from damp condition of the soil to the condition of the drought. If water is the limiting factor determining the growth of plants which is typical for low latitudes and the middle of the season of growth of plants, the correlation between LST and NDVI is negative. However, if the limiting factor of growth of plants is solar energy typical for high latitudes and the beginning of a season of growth of plants, the correlation between LST and NDVI is positive. The considered index is formulated as scalar convolution of NDVI and LST with rated weight coefficients  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$ . Offered way of increase of reliability of application of the TCIM index in zones of negative correlation between LST and NDVI is the following. If the variation  $\alpha_1$  is followed by corresponding change of the extremum of considered index that the judgment about the presence of the limiting development of vegetation of moisture factor is taken out. If the variation  $\alpha_1$  does not lead to the change of size of the extremum of considered index, the judgment about the lack of moisture is taken out, i.e. solar energy appears the limiting factor in this case.*

**Keywords:** drought index, optimization, correlation, vegetation, humidity.

**Введение.** Засуха как природное явление является следствием отсутствия осадков и водоснабжения земель. Существующие индексы засухи характеризуют количественную оценку степени засушливости земель путем использования данных об осадках и эвапотранспирации. Согласно работе [1], в настоящее время существуют более 150 индексов засухи. Необходимо отметить, что понятие «засуха» изменяется в зависимости от сферы применения этого понятия. Так, в сельском хозяйстве в основном имеется в виду отсутствие влаги в почве, а в гидрологии рассматриваются запоздалые следствия

недостатка осадков. Согласно [2], известны три категории индексов засухи: метеорологические; сельскохозяйственные; гидрологические.

Вместе с тем в работе [1] выделены еще три дополнительные категории: всесторонние; комбинированные; индексы засухи, сформированные на базе данных дистанционного зондирования.

Всесторонние индексы засухи используют различные метеорологические, сельскохозяйственные и гидрологические показатели для формирования всестороннего отображения особенностей засухи. Примером тому является Пальмеровский индекс силы тяжести засухи (PDSI).

Индексы засухи, использующие данные дистанционного зондирования, используют выходные данные различных систем дистанционного зондирования для картирования состояния земель. Здесь характерным примером является NDVI (нормализованный разностный индекс растительности).

Комбинированные индексы формируются с использованием известных индексов. В качестве примера можно привести индекс «US Drought Monitor» [3].

*Основные индексы засухи и состояние сельскохозяйственных земель.* Отметим, что еще в 1990 году был предложен индекс состояния растительности (VCI) в качестве индикатора стрессового воздействия окружающей среды, определяемый как [4]

$$VCI = \frac{(NDVI_i - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}, \quad (1)$$

где  $NDVI_i$  – величина NDVI, усредненная за неделю;  $NDVI_{min}$  – значение абсолютного минимума в течение пяти лет;  $NDVI_{max}$  – значение абсолютного максимума в течение пяти лет.

В 1995 году был предложен индекс температурного состояния (TCI) [5]. В работе [6] был предложен модифицированный вариант TCI (MTCI), определяемый как

$$MTCI = \frac{(LST_i - LST_{min})}{(LST_{max} - LST_{min})}, \quad (2)$$

где  $LST_i$  – температура усредненная за неделю;  $LST_{max}$ ,  $LST_{min}$  – значения максимума и минимума, обнаруженные в течение нескольких лет.

Индекс состояния влажности почвы (SMCI) определяется по формуле

$$SMCI = \frac{(SSM_i - SSM_{min})}{(SSM_{max} - SSM_{min})}, \quad (3)$$

где SSM – индекс влажности поверхности почвы.

Предложенный в работе [6] сельскохозяйственный индекс засухи (SMADI) определяется как

$$SMADI = SMCI \cdot \frac{MTCI}{VCI}. \quad (4)$$

Отметим, что индексы (1)÷(4) вычисляются применительно к каждому пикселю спутниковых изображений.

Предлагаемый универсальный индекс засухи и влажности почвы. Как видно из вышерассмотренных индексов состояния почвы, для вычисления результирующего индекса засухи SMADI требуется проведение относительно большего количества вычислений по формулам (1)÷(4). Кроме того, индекс SMADI, как и большинство спектральных объектных индексов, не обладает свойством интерактивности, т.е. в нем отсутствует специальный управляемый параметр, при изменении которого состояние исследуемого объекта могло бы быть определено по изменению значения индекса. Далее в настоящей статье рассматриваются вопросы разработки относительно простого универсального индекса засухи и влажности почвы, обладающего интерактивным свойством.

**Результаты и их обсуждение.** Предварительно рассмотрим существующую корреляционную связь между такими широко распространенными индексами, как NDVI и LST.

Согласно результатам экспериментальных исследований динамики временного изменения NDVI и LST, характер корреляционной связи между NDVI и LST претерпевает качественное изменение при переходе от влажного состояния почвы к состоянию засухи, что подтверждается графическим материалом, приведенном на рисунке [7]. Отметим, что наличие знакопеременной корреляционной связи между NDVI и LST применительно к условиям влажного и сухого климата наиболее полно освещено в работе [8]. Как отмечено в работе [8], если вода является

лимитирующим фактором, определяющим рост растений, что типично для низких широт и середины сезона роста растений, то корреляция между LST и NDVI отрицательная. Однако, если лимитирующим фактором роста растений является солнечная энергия, что типично для высоких широт и начала сезона роста растений, то корреляция между LST и NDVI положительная. Следовательно, как отмечается в [9], при использовании эмпирической связи между LST и NDVI для определения степени засухи в зонах с отрицательной корреляцией между этими индексами следует проявлять осторожность. Далее в настоящей статье предлагается способ, позволяющий повысить надежность использования указанных индексов в целях мониторинга степени засушливости почвы.

Рассмотрим предлагаемый функциональный аналог индекса здоровья растительности (VHI), предложенного в работе [5], определяемого как

$$VHI = \alpha_1 VCI + (1 - \alpha) TCI, \quad (5)$$

где TCI – индекс температурного состояния, определяемый как

$$TCI = \frac{(BT_{max} - BT')}{(BT_{max} - BT_{min})},$$

где BT – яркостная температура; BT' – среднее значение BT за рассматриваемый период времени.

Рассматриваемый далее индекс сформулируем как

$$TCIM = \alpha_1 \cdot NDVI + \alpha_2 LST, \quad (6)$$

где  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ .

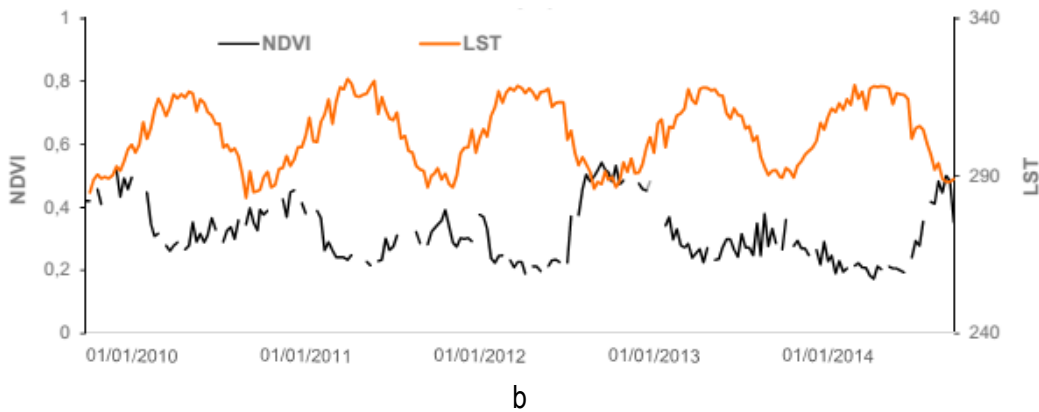
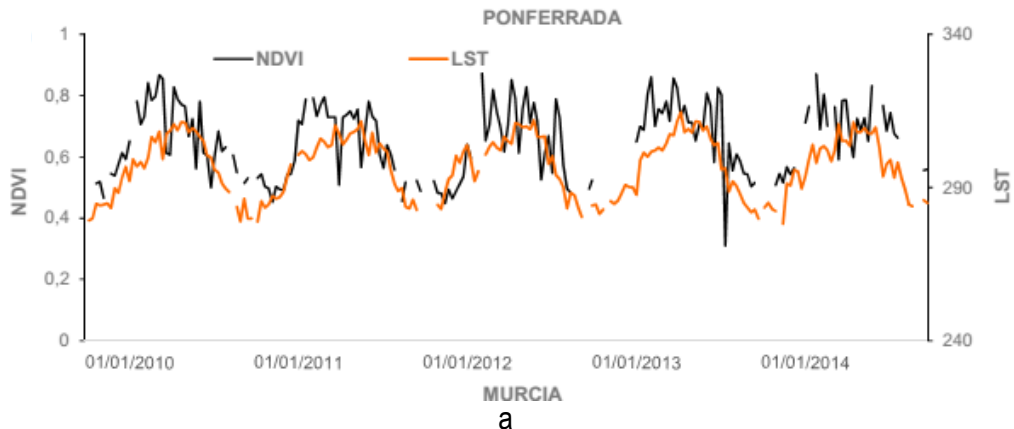
Предлагаемый способ повышения надежности применения индекса TCIM в зонах отрицательной корреляции между LST и NDVI заключается в следующем. Приняв обозначения  $f_1(t) = NDVI(t)$  и  $f_2(t) = LST(t)$ , представим  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  в виде первых трех членов ряда Тейлора:

$$f_1(t) = f_1(0) + f_1' \cdot \Delta t + \frac{f_1'' \cdot \Delta t^2}{2!}. \quad (7)$$

$$f_2(t) = f_2(0) + f_2' \cdot \Delta t + \frac{f_2'' \cdot \Delta t^2}{2!}. \quad (8)$$

Приняв  $f_1(0)=f_2(0)=0$  и, следовательно,  $\Delta t=t$ , с учетом выражений (6)–(8) запишем

$$TCIM = \alpha_1 f_1' \cdot t + \alpha_2 f_2' \cdot t + \frac{\alpha_1 f_1'' \cdot t^2}{2!} + \frac{\alpha_2 f_2'' \cdot t^2}{2!}. \quad (9)$$



Графики, подтверждающие наличие положительной корреляционной связи между NDVI и LST в условиях влажной почвы (a) и наличие отрицательной корреляционной связи между NDVI и LST в условиях засушливой почвы (b)

Исследуем выражение (9) на экстремум от  $t$ , используя метод анализа производных. Имеем

$$(TCIM)'_2 = \alpha_1 f_1' + \alpha_2 f_2' + \alpha_1 f_1'' \cdot t + \alpha_2 f_2'' \cdot t = 0. \quad (10)$$

Из выражения (10) находим

$$t_{opt} = - \frac{(\alpha_1 f_1' + \alpha_2 f_2')}{\alpha_1 f_1'' + \alpha_2 f_2''}. \quad (11)$$

Последовательно рассмотрим два случая.

1. Наличие сильной отрицательной корреляции между LST и NDVI, т.е. коэффициент корреляции  $k=-1$ .

2. Наличие сильной положительной корреляции между LST и NDVI, т.е. коэффициент корреляции  $k=1$ .

Применительно к детерминированным моделям (7) и (8) вышерассмотренный случай (1) корреляционной связи позволяет представить взаимосвязь  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  в следующем виде:

$$f_2(t) = A_1 - f_1(t), \quad (12)$$

т.е.  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  представляются в виде взаимно инверсных функций. При этом случай (2) позволяет представить  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$  в виде

$$f_2(t) = f_1(t). \quad (13)$$

С учетом выражений (11), (12), а также равенства  $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$ , получим

$$t_{opt1} = -\frac{(\alpha_1 f_1' - (1 - \alpha_1) \cdot f_1')}{\alpha_1 f_1'' - (1 - \alpha_1) \cdot f_1''} = -\frac{2\alpha_1 f_1' - f_1'}{2\alpha_1 f_1'' - f_1''} = -\frac{f_1'}{f_1''} \quad (14)$$

С учетом выражений (9) и (14) вычислим экстремальную величину  $TCIM_{экс}$

$$TCIM_{экс1} = \frac{f_1^{12}}{f_1''} \left( \frac{1}{2} - \alpha_1 \right). \quad (15)$$

Таким образом, значение  $TCIM_{экс}$  оказывается функцией  $\alpha_1$  при  $\alpha_1 < \frac{1}{2}$ , экстремум оказывается максимумом, а при  $\alpha_1 > \frac{1}{2}$  минимумом.

С учетом выражений (11) и (13), а также равенства  $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$ , получим

$$t_{opt2} = -\frac{(\alpha_1 f_1' + (1 - \alpha_1) \cdot f_1')}{\alpha_1 f_1'' + (1 - \alpha_1) \cdot f_1''} = -\frac{f_1'}{f_1''} \quad (16)$$

С учетом выражений (9) и (16) получим

$$TCIM_{экс2} = -\frac{f_1^{12}}{f_1''}. \quad (17)$$

Таким образом, как показывает проведенный анализ, в вышерассмотренном первом случае  $TCIM_{экс.1}$  оказывается функцией весового коэффициента  $\alpha_1$ , а во втором случае такая зависимость отсутствует.

Анализ полученных результатов позволяет выработать следующие практические рекомендации надежного использования индекса  $TCIM$  для оценки степени засушливости исследуемых участков.

1. Сбор данных об  $LST(t)$  и  $NDVI(t)$ .
2. Определение  $t_{opt}$ , где индекс  $TCIM$  достигает экстремальной величины.
3. Осуществление варьирования величины  $\alpha_1$ .
4. Если варьирование  $\alpha_1$  сопровождается соответствующим изменением  $TCIM_{экс.1}$ , то выносится суждение о присутствии лимитирующего фактора, каковым является влага. При этом,

чем больше множитель  $\frac{f_1^{12}}{f_1''}$ , тем сильнее ока-

зывается этот лимитирующий фактор, т.е. имеется дефицит влаги.

5. Если варьирование  $\alpha_1$  не приводит к изменению величины  $TCIM_{экс.1}$ , то выносится суждение об отсутствии недостатка влаги, т.е. лимитирующим фактором в данном случае оказывается солнечная энергия.

## Выводы

1. Приведен краткий обзор индексов засухи, выработанных на основе известных индексов  $NDVI$  и  $LST$ .
2. Предложен функциональный аналог известного индекса здоровья растительности, показаны экстремальные свойства предложенного индекса.
3. Показано, что наличие управляемости величины экстремального значения предложенного индекса путем изменения весовых коэффициентов свидетельствует о наличии лимитирующего воздействия фактора влаги, т.е. засухи. Отсутствие такой управляемости показывает главенство лимитирующей роли солнечного излучения и отсутствие признаков засухи.

## Литература

1. Niemeyer S. New drought indices // Options Mediterraneenes. Serie A: Seminaires Mediterraneenes. – 2008. – 80. – 267–274.
2. Zargar A., Sadiq R., Naser B. [et al.]. A review of drought indices // Environ. Rev. 19: 333–349 (2011). Doi<sup>^</sup> 10.1139/A11-013.
3. Svoboda M.D., LeComte D., Hayes M.J. The drought Monitor // Bull. Am. Meteorol. – 2002. – Soc. 93 (8). – 1181–1190.
4. Kogan F.N. Remote Sensing of weather impacts on vegetation in nonhomogeneous areas // Int. J. Remote Sens. – 1999. – № 11. – P. 1405–1419.
5. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection // Adv. Space Res. – 1995. – № 11. – P. 91–100.
6. Sanchez N., Martinez-Fernandez J., Gonzalez-Zamora A. A combined approach with SMOS and MODIS to monitor agricultural

- drought // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and spatial Information Sciences (XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016). – 2016. – Vol. XLI-B8. – Prague, Czech Republic. – P. 39–398.
7. Sanchez N., Gonzalez-Zamora A., Piles M. [et al.]. A new soil moisture agricultural drought index (SMADI) integrating MODIS and SMOS products: A case of Study over the Iberian Peninsula // Remote Sens. – 2016. – 8. – 287, doi:10.3390/rs8040287.
  8. Karnieli A., Agam N., Pinker R.T. [et al.]. Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment // Merits and Limitations. Journal of climate. – 2009. – Vol. 23. doi:10.1175/2009JCLI2900.1
  4. Kogan F.N. Remote Sensing of weather impacts on vegetation in nonhomogeneous areas // Int. J. Remote Sens. – 1999. – № 11. – P. 1405–1419.
  5. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection // Adv. Space Res. – 1995. – № 11. – P. 91–100.
  6. Sanchez N., Martinez-Fernandez J., Gonzalez-Zamora A. A combined approach with SMOS and MODIS to monitor agricultural drought // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and spatial Information Sciences (XXIII ISPRS Congress, 12-19 July 2016). – 2016. – Vol. XLI-B8. – Prague, Czech Republic. – P. 39–398.
  7. Sanchez N., Gonzalez-Zamora A., Piles M. [et al.]. A new soil moisture agricultural drought index (SMADI) integrating MODIS and SMOS products: A case of Study over the Iberian Peninsula // Remote Sens. – 2016. – 8. – 287, doi:10.3390/rs8040287.
  8. Karnieli A., Agam N., Pinker R.T. [et al.]. Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment // Merits and Limitations. Journal of climate. – 2009. – Vol. 23. doi:10.1175/2009JCLI2900.1

### Literatura

1. Niemeyer S. New drought indices // Options Mediterraneenes. Serie A: Seminaires Mediterraneenes. – 2008. – 80. – 267–274.
2. Zargar A., Sadiq R., Naser B. [et al.]. A review of drought indices // Environ. Rev. 19: 333-349 (2011). Doi^ 10.1139/A11-013.
3. Svoboda M.D., LeComte D., Hayes M.J. The drought Monitor // Bull. Am. Meteorol. – 2002. – Soc. 93 (8). – 1181–1190.

УДК 333. 95416 (Т2-575)

О.Н. Романчук

## РАЗВИТИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА И РЕКРЕАЦИИ НА ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

О.Н. Романчук

## THE DEVELOPMENT OF ECOLOGICAL TOURISM AND RECREATION IN ESPECIALLY PROTECTED NATURAL TERRITORIES OF KRASNOYARSK REGION

**Романчук О.Н.** – асп. каф. разведения, генетики, биологии и водных биоресурсов Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: mangust343@yandex.ru

**Romanchuk O.N.** – Post-Graduate Student, Chair of Cultivation, Geneticists, Biology and Water Biological Resources, Krasnoyarsk State Agricultural University. Krasnoyarsk. E-mail: mangust343@yandex.ru

На Всемирном экотуристском саммите в мае 2002 г. была принята Квебекская декларация по экотуризму (ЭТ), было подчеркнуто,

что хотя понятие «экотуризм» в качестве туристского термина используется уже около 20 лет, отсутствие четкого определения по-