

О сезонном изменении корреляции между альбедо и температурой поверхности пустыни Сонора в Северо-Западной Мексике

А.Н.Золотокрылин¹, Т.Б.Титкова¹, И.Э.Терещенко²

¹ Учреждение Российской академии наук «Институт географии РАН» (ИГ РАН)
119017 Москва, Старомонетный пер., 29

E-mail: zgoldfinch@mtu-net.ru

² Universidad de Guadalajara Division de Ciencias Básicas
Guadalajara, Jalisco; México

E-mail: iteresh@mail.ru

Климатологические месячные данные AVHRR NOAA (калиброванные альбедо и температура поверхности, NDVI) использованы для исследования корреляции между альбедо и температурой поверхности пустыни Сонора. Показано, что в сухой период с апреля по начало июля корреляция между параметрами отрицательная (радиационное терморегулирование). В пик Северо-Американского муссона (вторая половина июля, август, начало сентября) корреляция становится положительной и начинает доминировать эвапотранспирационное терморегулирование. В остальные месяцы корреляция между параметрами не выражена. Определено критическое значение NDVI, ниже которого доминирует радиационное терморегулирование.

Ключевые слова: альбедо, температура поверхности, NDVI, корреляция, обратные связи, зеленая фитомасса, пустыня Сонора, Северо-запад Мексики

Введение

Наземные и дистанционные синхронные измерения альбедо и температуры засушливых земель Азии и Африки показывают, что в зависимости от проективного покрытия растительного покрова между этими параметрами возможна как положительная, так и отрицательная пространственная корреляция [1,2]. В данном случае отрицательная (положительная) корреляция отражает соответственно радиационный (эвапотранспирационный) фактор регулирования температуры поверхности.

Настоящая работа направлена на изучение годового хода факторов терморегулирования поверхности пустыни Сонора (Северо-Западная Мексика). Его понимание важно для мониторинга опустынивания, так как продолжительность периода с доминированием радиационного фактора в течение года может быть оценкой интенсивности опустынивания. Косвенным признаком доминирования радиационного фактора может служить нормированный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)-индикатор зеленой фитомассы, точнее его пороговое значение [1]. Оценка порогового NDVI и его применение позволяет упростить и ограничить мониторинг опустынивания данными NDVI AVHRR и MODIS.

Территория, материалы и методы

Субтропическая пустыня Сонора занимает большую часть штатов Нижняя Калифорния и Сонора в Мексике, а также распространяется на территории штатов Аризона и

Калифорния США. Сонора одна из наиболее жарких четырех пустынь Северной Америки.

Территория исследования включает пустыню Сонора и прилегающие к ней районы и ограничена 23-35N и 109-117W. Основное внимание было уделено пустыне на территории Мексики, в частности квадрату 30-31N и 112-113W. в штате Сонора, выходящему Калифорнийскому заливу (рис. 1).

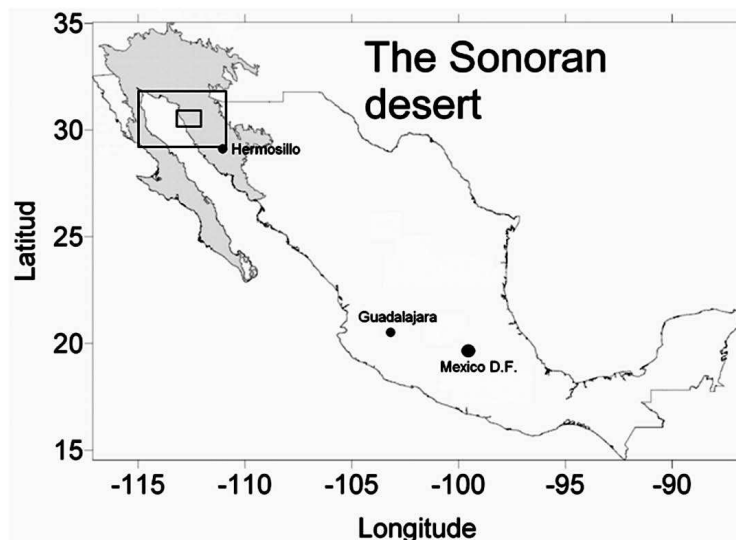


Рис. 1. Территория исследования

Климат пустыни Сонора относительно однороден, но имеет региональные различия вследствие высоты и географического положения. Количество осадков колеблется от 100 до 250 мм/год. Осадки в течение года выпадают неравномерно, сильно колеблясь по годам. Здесь отмечено два дождливых периода: зимний – с декабря по март и летний – с ливневыми дождями с июля по сентябрь. Зимние осадки связаны с прохождением циклонов и фронтов через Северо-Американский континент. Летние осадки обусловлены Северо-Американским (Мексиканским) муссоном и приносятся влажными ветрами с Мексиканского и Калифорнийского заливов. Засушливые периоды наблюдаются в апреле – начало июля и в октябре-ноябре (рис. 2).

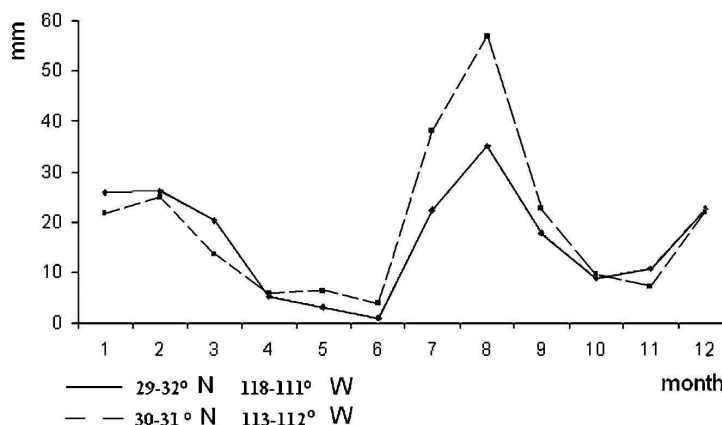


Рис. 2. Средний годовой ход месячных сумм осадков в пустыне Сонора

В работе использованы данные, полученные радиометром (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) со спутников Национальной администрации по океа-

ну и атмосфере США (NOAA-9 и NOAA-11): месячные значения NDVI, калиброванные месячные значения альbedo (каналы 1 и 2 AVHRR) и калиброванные месячные значения температуры поверхности (каналы 4 и 5 AVHRR) [3]. Данные осреднены за период 1985-1994 гг. Пространственное разрешение данных 16x16 км. Из данных исключены пропуски за период перехода от наблюдений со спутника NOAA-9 к наблюдениям со спутника NOAA-11 в 1988 г. и за период извержения вулкана Пинатубо в 1991 г.

Дополнительно в работе были использованы среднемесячные суммы осадков по данным наблюдений на 23 станциях на территории 28-33N и 118-110W за период 1985-1994 гг. Станционные данные были пересчитаны в узлы регулярной сетки 05x05° с помощью программы WINSURF. Затем были получены средние суммы осадков для двух районов (29-32N 111-116,5W и 30-31N 112-113W) и построены графики внутригодового хода осадков в этих районах за период 1985-1994 гг. (рис.2)

Результаты

Особенности соотношения между альbedo и температурой поверхности рассматриваются на примере анализа месячных данных (альbedo, температура, NDVI) в штате Сонора (29-32N, 111-115W) в частности на территории 30-31N и 112-113W.

Соотношение между месячными значениями альbedo и температурой поверхности за год

На рис. 3 изображено поле точек месячной температуры при соответствующих значениях месячного альbedo и NDVI. Как видно из рисунка, заметна дифференциация точек по месяцам. Ясно выражено внутригодовое изменение температуры поверхности при заданном значении альbedo. Но трудно сделать вывод о типе зависимости температуры поверхности от альbedo. Отметим, что наименьшее внутригодовое изменение температуры поверхности наблюдалось при минимальных значениях альbedo (максимальные значения NDVI). С увеличением альbedo внутригодовой размах температуры поверхности вначале возрастал, достигнув максимума при значении альbedo около 0.19 (NDVI≈0.06-0.14), а затем стал вновь уменьшаться. При максимальном альbedo размах температуры поверхности достигал почти 22°C при значениях NDVI в пределах 0.09-0.11.

Зеленая фитомасса территории подвержена значительному изменению в течение года: NDVI колеблется от 0.19 в августе до 0.07 в мае-июне. В верхней части рис.3 выделяется поле точек температуры поверхности с минимальными значениями NDVI ≤ 0.08 , которые на территории отмечались преимущественно в июне и отчасти в мае и июле. Внутригодовой ход NDVI отражает изменение альbedo от 0.15 до 0.23. В то же время диапазон внутригодового хода температуры составляет примерно 25°C (23-48°C). Наиболее высокие температуры при наименьших значениях NDVI отмечались в июне. Далее выделяются июль и май с более низкими температурами (43-44°C). Для апреля, сентября и августа с максимальным варьированием NDVI на территории характерна температура поверхности от 38 до 42°C.

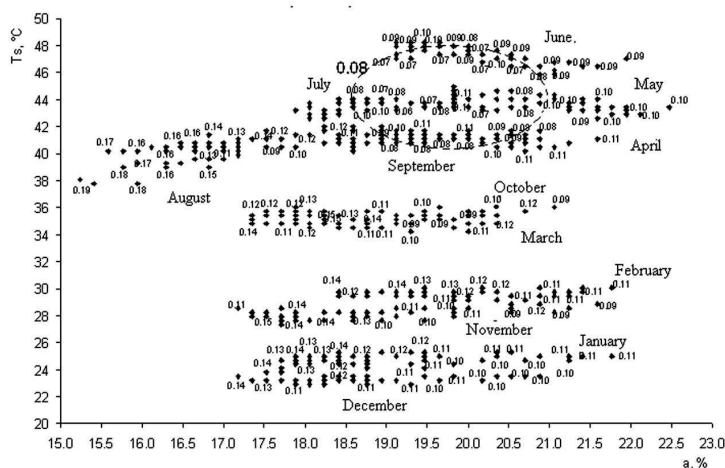


Рис. 3. Соотношение между альбедо и температурой поверхности в пустыне Сонора (30-31N, 112-113W). Цифры около точек – оценки NDVI. Месячные данные осреднены за период 1985-1994 (Gutman et al, 1995)

Соотношение между месячными значениями альбедо и температурой поверхности

Рассмотрение данных за отдельные месяцы проясняет картину соотношения между альбедо и температурой. В сухие месяцы (май, июнь) доминирует радиационное регулирование температуры поверхности (рис. 4a,b). Как видно из рисунка, между параметрами существует отрицательная корреляция (-0.75), а значения NDVI убывают с повышением альбедо и понижением температуры.

Ситуация меняется в июле и в более влажном августе (рис. 4c,d). В августе происходит увеличение NDVI на большей части территории с максимумом до 0.19, т.е. возрастает зеленая транспирирующая фитомасса. Увеличивается доля радиационного баланса, затрачиваемая на эвапотранспирацию (транспирацию и испарение с поверхности почвы) и уменьшается доля энергии на турбулентный прогрев приземного воздуха. В итоге на большей части территории доминирует эвапотранспирационное регулирование температуры поверхности с положительной корреляцией между альбедо и температурой поверхности (левая часть аппроксимирующей кривой на рис. 4d).

Одновременно на территории сохраняются участки с минимальной зеленой фитомассой (NDVI не превышает 0.09). Это вершина аппроксимирующей точки кривой (правая часть рис.4d) Здесь вероятнее всего равное проявление как эвапотранспирационного, так и радиационного факторов.

Продолжительность периодов с преимущественным терморегулированием температуры поверхности

Из анализа данных можно выделить три периода, в каждом из которых доминирует или радиационный, или эвапотранспирационный, или радиационно-эвапотранспирационный типы. Радиационный тип имеет преимущественное значение в апреле-июне. В это время на территории фитомасса снижается до минимального уровня, а температура поверхности отрицательно коррелирует с альбедо. Таким образом, создаются условия для формирования и поддержания пустынного климата, пока внешний фактор (осадки) не создаст новую ситуацию.

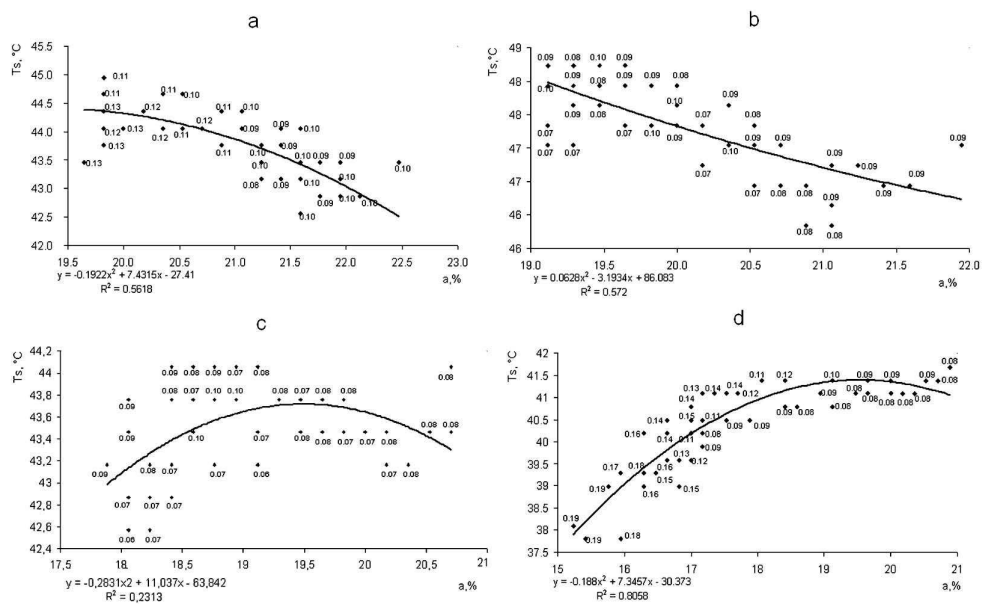


Рис. 4. Соотношение между альбедо и температурой поверхности в пустыне Сонора (30-31N, 112-113W). Цифры около точек – оценки NDVI. Месячные данные осреднены за период 1985-1994 (Gutman et al, 1995). а)-май, б)-июнь, с)-июль, д)-август

Доминирование эвапотранспирационного регулирования проявляется очень короткое время в августе-сентябре, когда отмечаются максимальные месячные осадки. Увеличение зеленой фитомассы повышает эвапотранспирационный расход влаги, которое уменьшает долю энергии, затрачиваемую на турбулентный прогрев приземной атмосферы и прогрев почвы. Радиационное регулирование остается еще большим, но оно подавляется эвапотранспирационным фактором. Таким образом, климат территории приобретает полупустынные черты, хотя в некоторых ее каменистых частях с изреженной растительностью возможно сохранение локальных пустынных климатов.

В остальное время года (октябрь-март) ни радиационный, ни эвапотранспирационный факторы не имеют преимущественного значения. Уменьшение прихода солнечного тепла снижает действенность радиационного фактора, но в результате увеличения зимних осадков усиливается эвапотранспирационный фактор. Таким образом, сохраняется и поддерживается равновесие между факторами терморегулирования, а корреляция между альбедо и температурой падает.

Среднее NDVI, ниже которого имеет преимущественное значение радиационное терморегулирование поверхности

В целях мониторинга опустынивания важно знать пороговое значение месячного NDVI, которое характеризует доминирование радиационного фактора регулирования температуры поверхности в пустыне Сонора. Оно может варьировать в зависимости от пространственного масштаба исследования. Для этого обратимся к рис. 5а,б,с, на котором изображены гистограммы NDVI в мае, июне и июле, для территории 30-31N и 112-113W (локальный масштаб). Из сравнения гистограмм видно, что среднее NDVI понижается от 0.103 ± 0.013 в мае до 0.086 ± 0.01 в июне и до 0.08 ± 0.01 в июле. Фактически NDVI в июле по сравнению с июнем не меняется.

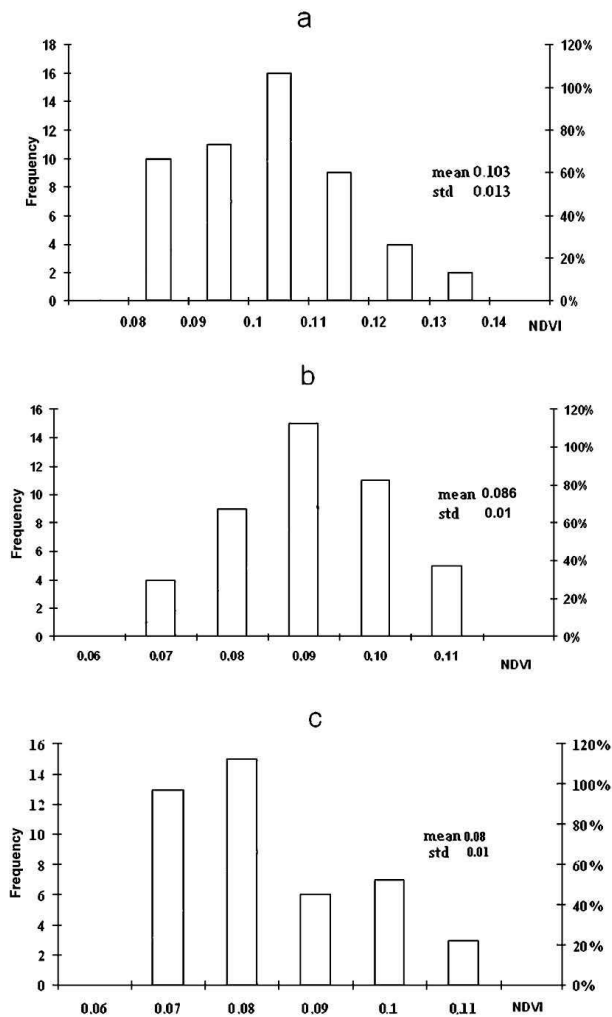


Рис. 5. NDVI-гистограмма в пустыне Сонора (30-31N, 112-113W).
а-май, б-июнь, с-июль

Такая ситуация возможна, если эффективные осадки, т.е. достаточные для развития травянистого яруса, выпадают преимущественно во вторую половину июля. Так как для вегетации травянистого яруса необходимо время (в пустынях Центральной Азии примерно месяц), то увеличение зеленой фитомассы может быть отражено NDVI только в августе. В итоге, для данной территории за пороговый NDVI можно принять значение 0.08 ± 0.01 , ниже которого имеет место доминирование фактора радиационного терморегулирования.

Как меняется пороговый NDVI с увеличением пространственного масштаба (территория 29-32N, 111-115W) видно из рис.6. Гистограмма приближается к бимодальной. Это указывает на то, что на участках с NDVI менее 0.06-0.07, представляющих две трети территории, доминирует радиационное терморегулирование. Следует отметить, что на участках с NDVI более 0.17-0.19, т.е. с более высокой фитомассой, повышается роль эвапотранспирационного терморегулирования. Таким образом, с увеличением масштаба пороговое значение NDVI несколько снижается, становится более устойчивым и принимает значение $NDVI \leq 0.07$. Подобный результат был получен также для засушливых земель Центральной Азии и Сахеля [1].

Важно отметить, что в пустыне Сонора площадь с пороговым значением $NDVI \leq 0.07$ становится максимальной в июне. В самом влажном месяце (август) эта площадь сокращается до минимума.

Дискуссия

Представление о феномене сезонного изменения факторов терморегулирования засушливых земель позволяет детальнее описывать динамику опустынивания и его мониторинг. Здесь важно рассмотреть два аспекта. Первый связан с разработкой энергетического механизма переключения факторов терморегулирования. Данная работа констатирует, что переключение возможно при определенном значении NDVI. Для понимания механизма переключения требуется постановка экспериментальных энергобалансовых исследований с вычислением радиационных и вертикальных турбулентных потоков тепла и влаги в приземном слое атмосферы и почве.

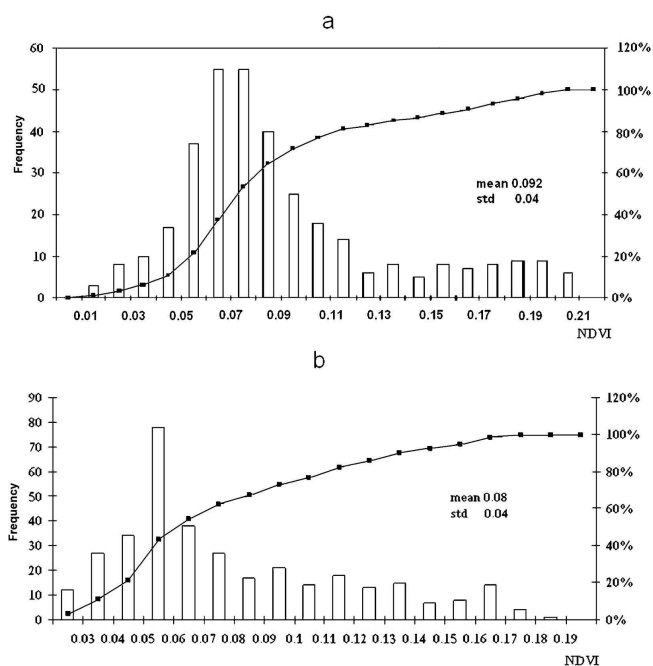


Рис. 6. NDVI-гистограмма в пустыне Сонора (29-32N, 112-116W).
а-июнь, б-июль

Второй аспект исследования связан с индикатором переключения. Строго говоря, им может быть зеленая фитомасса, т.е. количество ассимилирующей растительной массы на единицу площади. Оценка индикатора требует многолетних экспериментальных работ в разных типах растительного покрова. Данный индикатор можно рассматривать в качестве основного (эталонного) для перехода к дистанционному индикатору NDVI, поскольку между зеленой фитомассой и NDVI существует тесная корреляционная зависимость [4]. Эталонный индикатор необходим также для корректировки данных NDVI, которые получены разными радиометрами (AVHRR и MODIS). Задача получения однородных рядов NDVI – одна из первоочередных. Она возникла в связи с применением с 2000 г. радиометра MODIS вместо радиометра AVHRR на новой серии спутников.

Заключение

Анализ синхронных спутниковых данных альбедо и температуры поверхности, NDVI в пустыне Сонора показывает, что на территории в течение года возможно смена

доминирующих факторов терморегулирования. Радиационный фактор доминирует в сухие месяцы апрель-начало июля, когда на большей части территории NDVI становится меньше порогового значения 0.08 ± 0.01 . В этом случае температура поверхности отрицательно коррелирует с альбедо, что может служить основанием для формирования положительной обратной связи альбедо-осадки, поддерживающей опустынивание.

Эвапотранспирационный фактор терморегулирования доминирует в пик Северо-Американского муссона конец июля-начало сентября. Положительная корреляция между альбедо и температурой в эти месяцы создает условия для формирования отрицательной обратной связи альбедо-осадки, препятствующей опустыниванию.

В осенние и зимние месяцы отмечается равновесие между радиационным и эвапотранспирационным типами терморегулирования, когда корреляция между альбедо и температурой поверхности становится малой.

Для мониторинга опустынивания важен анализ площади со значением NDVI ниже порогового как в сухие, так и во влажные месяцы и определение тенденции изменений.

Литература

1. Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание. Отв. ред. А.Н.Кренке // М.: Наука, 2003. 246 с.
2. Золотокрылин А.Н. Факторы регулирования температуры засушливых земель по данным AVHRR NOAA. Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. Сборник научных статей. Вып.6. Том II. М.: ООО «Азбука-2000», 2009. С.380-387.
3. Gutman G., Tarpley D., Ignatov A., Olson S. Global land products from AVHRR: The enhanced NOAA GVI dataset // *Bull. Amer. Met. Soc.* 1995, **76** (7), 1141-1156.
4. Tucker C.J., Vanpraet C.L., Sharman M.J., Van Ittersum G. Satellite remote sensing of total herbage biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984 // *Remote Sens. Environ.* 1985. Vol.17. P.233-249.

On seasonal variation of surface temperature-controlling factors in the Sonoran Desert, North-West Mexico

Alexander Zolotokrylin¹, Tatiana Titkova¹, Iryna Tereshchenko²

¹ *Institute of Geography Russian Academy of Sciences
119017 Moscow, 29 Staromonetny per.
E-mail: zgoldfinch@mtu-net.ru*

² *Universidad de Guadalajara Division de Ciencias Básicas
Guadalajara, Jalisco; México
E-mail: iteresh@mail.ru*

Climatologic monthly data AVHRR NOAA (calibrated albedo and surface temperature, NDVI) are used to inquire into a question on correlation between albedo and surface temperature in Sonora desert. Our study demonstrate negative correlation between these parameters (radiation thermo-regulation) during dry period from April to beginning of July. Correlation became positive over the North American monsoon's peak period (second half of July – beginning of September), evapotranspiration thermo-regulation begin to prevail. Correlation is indistinct during the rest of the year. NDVI critical value (radiation thermo-regulation prevail below this level) is determined.

Keywords: albedo, surface temperature, NDVI, correlation, feedbacks, green phytomass, Sonora desert, Northwest Mexico.