

Факторы регулирования температуры засушливых земель по данным AVHRR NOAA

А.Н. Золотокрылин

Учреждение Российской академии наук «Институт географии РАН» (ИГ РАН)

119017 Москва, Старомонетный пер., 29

E-mail: zgoldfinch@mtu-net.ru

Спутниковые среднегодовые месячные значения альbedo и температуры засушливых земель Северного Прикаспия показывают, что в зависимости от зон растительности между этими параметрами возможна как положительная, так и отрицательная пространственная корреляция. Отрицательная проявляется преимущественно в пустынях, а положительная – в степи и полупустыне. Показано, что в случае отрицательной корреляции доминирует радиационное регулирование температуры поверхности, а в случае положительной – эвапотранспирационное. Антропогенная деградация растительности в полупустыне усиливает радиационное регулирование. Определено значение NDVI AVHRR, ниже которого доминирует радиационное регулирование температуры поверхности.

Ключевые слова: альbedo и температура поверхности, NDVI AVHRR, засушливые земли, радиационное/ эвапотранспирационное терморегулирование поверхности.

Введение

Засушливые земли – это аридные, семиаридные и сухие субгумидные районы, в которых коэффициент увлажнения (отношение среднего ежегодного уровня осадков к потенциальной эвапотранспирации по Торнтвейту [1]) колеблется в диапазоне от 0.05 до 0.65 [2].

На засушливых землях между собой «конкурируют» три основных фактора регулирования температуры подстилающей поверхности [3].

Первый – *радиационный*: если альbedo поверхности увеличивается, то поглощенная поверхностью радиационная энергия уменьшается, вызывая уменьшение температуры поверхности, и наоборот.

Второй – *эвапотранспирационный*: если альbedo поверхности увеличивается, что часто бывает при угнетении и изреживании растительного покрова в период длительного дефицита осадков или при антропогенном воздействии, величина эвапотранспирации уменьшается. Это ведет к повышению температуры поверхности, и наоборот. Эвапотранспирационное регулирование температуры поверхности тесно связано с аэродинамическим регулированием через параметр шероховатости.

Третий – *аэродинамический*: если плотность низкого растительного покрова (травостой, кустарники) уменьшается, то поверхность становится ровнее (снижается параметр шероховатости). Это уменьшает вертикальные потоки явного и скрытого тепла, что повышает температуру поверхности в дневные часы.

Интерес к разному соотношению факторов терморегулирования возник в результате интерпретации численных экспериментов Charney [4] по определению влияния альbedo засушливых районов на региональный климат [5-9]. По Charney [4] радиационный фактор начинает преобладать в условиях антропогенной деградации растительного покрова, в результате которой альbedo возрастает, а температура понижается (отрицательная корреляция). В итоге уменьшаются конвекция, облачность и осадки, вызывая дальнейшее увеличение альbedo. Таким

образом, возникает положительная обратная связь альbedo-осадки (альбедный механизм опустынивания Charney), поддерживающая антропогенное опустынивание.

С точки зрения оппонентов, альбедный механизм опустынивания проявляется в условиях сильно изреженной растительности пустынь и реже полупустынь независимо от причин ее изреживания: природной или антропогенной. На территории с более высокими запасами фитомассы, чем в пустыне, радиационный фактор терморегулирования поверхности подавляется эвапотранспирационным. В этом случае при увеличении альbedo поверхности ее температура возрастает (положительная корреляция), усиливается конвекция, облачность и осадки и альbedo снижается. Возникает отрицательная обратная связь альbedo-осадки, препятствующая развитию опустынивания.

В 1980-е годы были опубликованы результаты вначале наземных, а затем и спутниковых синхронных наблюдений за альbedo и температурой поверхности, показывающих не только падение температуры при увеличении альbedo в пустынях, но и повышение температуры поверхности с развитым растительным покровом при его антропогенном или естественном изреживании [10-16]. Детальный сравнительный анализ наземных, вертолетных и спутниковых данных, раскрывающий особенности изменения соотношения между альbedo и температурой в пустынях и полупустынях разных засушливых регионов Азии и Африки представлен в работе [17].

Работа направлена на выявление и изучение факторов терморегулирования засушливых земель Прикаспийской низменности по осредненным спутниковым данным альbedo и температуры поверхности. Особое внимание уделено исследованию связи факторов терморегулирования с растительными зонами. Для мониторинга опустынивания важно установить растительную зону, в которой имеет преимущественное значение поддерживающий

опустынивание радиационный фактор терморегулирования. Косвенным признаком доминирования радиационного фактора может служить пороговое значение нормированного разностного вегетационного индекса (Normalized difference vegetation index, NDVI), при котором возможна смена факторов терморегулирования [17].

Территория исследования и данные

На затрагиваемых антропогенным опустыниванием засушливых землях Северного Прикаспия были выбраны две территории (рис. 1). Первая представляет собой меридиональную трансекту (47,5-51° с.ш., 48-51° в.д.), пересекающая зональные ландшафты северной пустыни, полупустыни и сухой степи на территории России и Казахстана. Вторая территория расположена в Северо-Западном Прикаспии (45-47° с.ш. и 45-47° в.д.) и представлена полупустынными и сухостепными ландшафтами. В нее входят Черные земли Калмыкии.

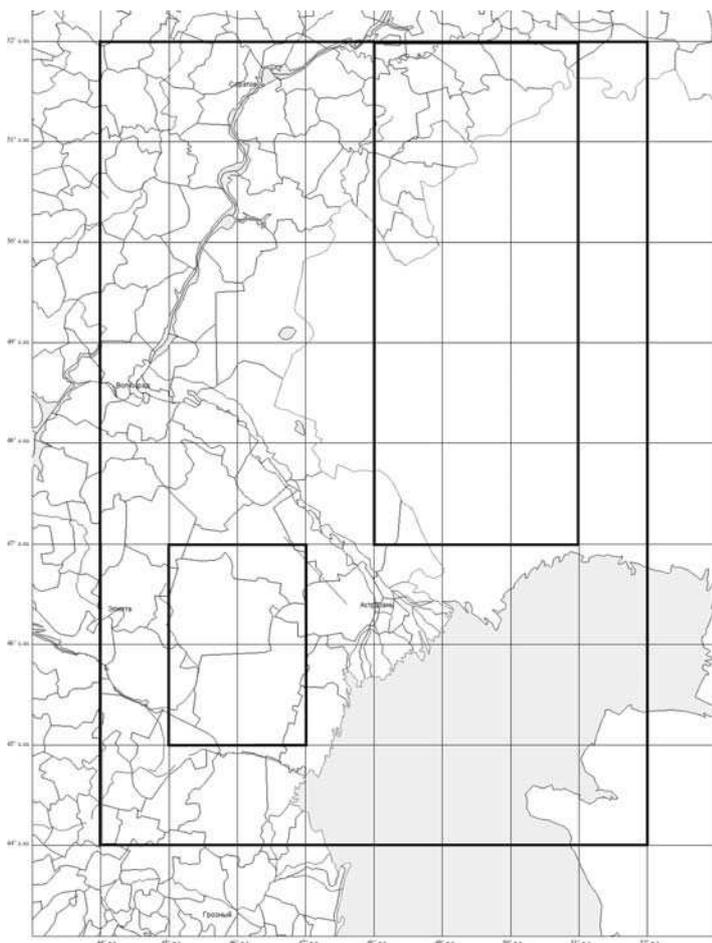


Рис. 1. Территории исследования в Северном Прикаспии: первая – 47,5-51° с.ш., 48-51° в.д., вторая – 45-47° с.ш., 45-47° в.д.

В работе использованы данные, полученные радиометром (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) со спутников Национальной администрации по океану 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) [18]. Данные осреднены за период апрель 1985-сентябрь 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.

Результаты и их обсуждение

Соответствие факторов терморегулирования зональному распределению растительности иллюстрирует рис. 2., на котором изображена связь между альbedo и температурой поверхности на меридиональной трансекте в Волго-Уральском междуречье. Территория затронута антропогенным опустыниванием, а ее растительность сильно деградирована в результате перевыпаса. С увеличением широты более светлые песчаные поверхности трансекты сменяются супесчаными и далее более темными суглинистыми. Одновременно происходит характеризующее NDVI нарастание зеленой фитомассы. В итоге альbedo поверхности монотонно уменьшается, а рост поглощенной коротковолновой радиации почвой компенсируется уменьшением ее прихода с широтой. При этом при переходе от северной пустыни к полупустыне отмечается некоторое повышение радиационного баланса, а затем его снижение в полупустыне и далее в сухой степи. Как следствие, по направлению на север температура поверхности северной пустыни повышается, в полупустыне достигает максимума (36.5°C), а затем быстро понижается с увеличением фитомассы.

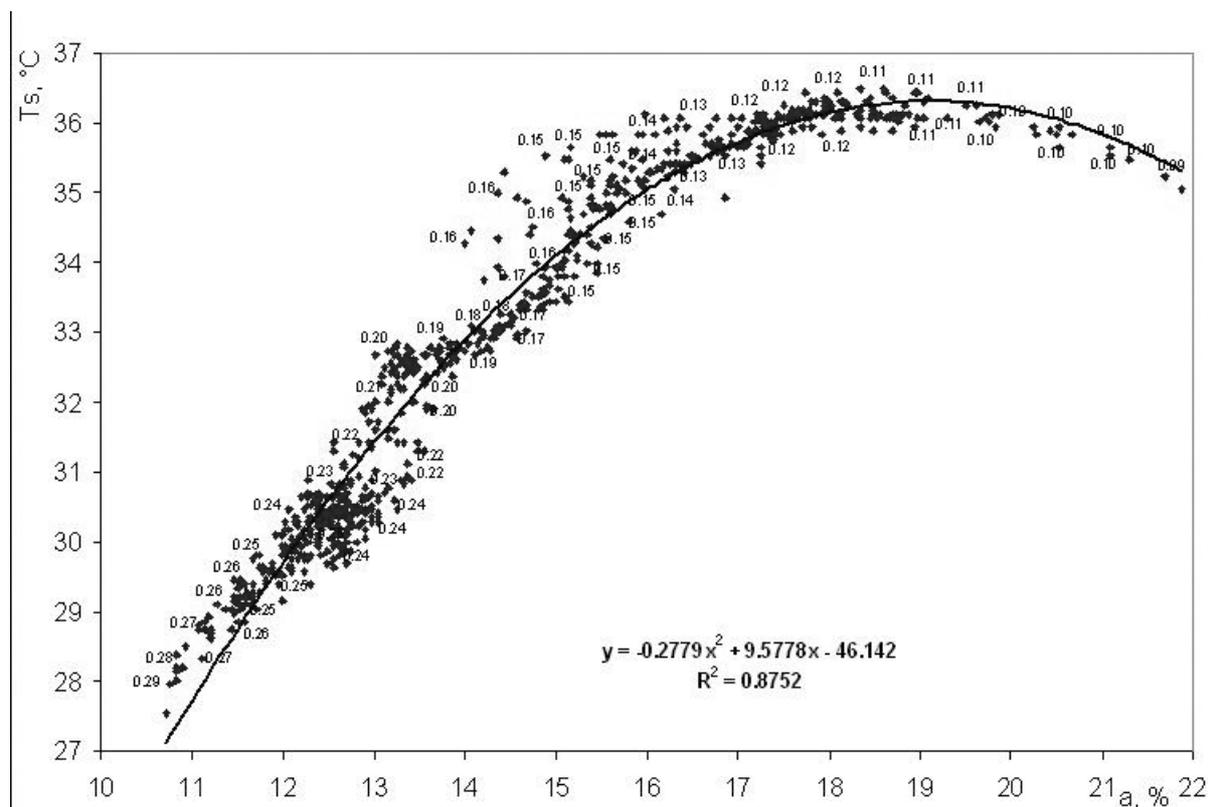


Рис. 2. Соотношение между месячными значениями альbedo и температурой поверхности. Территория: 47,5-51° с.ш., 48-51° в.д. Около точек проставлены месячные значения NDVI AVHRR. Период: май-сентябрь 1985-2004 гг. Исходные данные из работы [18]. Зоны растительности: сухая степь (NDVI более 0.19), полупустыня (NDVI = 0.11-0.19), северная пустыня (NDVI менее 0.11)

Точки поля рис. 2 условно делятся на три участка по значениям NDVI: (1) более 0.14; (2) 0.11-0.14; (3) менее 0.11. Точки участка 1 с NDVI от 0.14 до 0.20 представлены растительностью полупустыни, в которой имеет место взаимопроникновение пустынных и степных растительных ассоциаций. NDVI более 0.20 характеризует сухую степь с преобладанием степных видов. NDVI менее 0.11 представляет пустынную растительность (точки участка 3), а NDVI в диапазоне 0.11-0.14 - пустынные виды с вкраплением степных. Условно переход от пустыни к полупустыне происходит при альбедо 19%, а переход от полупустыни к сухой степи – при альбедо 13-14%.

Как видно из рис. 2, температура поверхности повышается с увеличением альбедо (доминирование эвапотранспирационного фактора терморегулирования) на участке 1. Коэффициент корреляции между альбедо и температурой поверхности значим с вероятностью 0.95 и составляет 0.9. Температура поверхности понижается с увеличением альбедо (доминирование радиационного фактора терморегулирования) на участке 3. На участке 2 поля точек корреляционная связь между альбедо и температурой поверхности не выражена. Здесь во влажные годы может иметь преимущественное значение эвапотранспирационный фактор, а в сухие – радиационный.

Так как зеленая фитомасса прикаспийской северной пустыни выше фитомассы среднеазиатских средних и южных пустынь, то радиационное терморегулирование выражено в Прикаспии значительно слабее. Отметим, что альбедо в среднеазиатских пустынях колеблется от 22 до 25%, а NDVI становится меньше 0.07 [17], в то время как в северной пустыне радиационное терморегулирование проявляется при альбедо выше 19% и при NDVI в диапазоне 0.09-0.10. Можно предположить, что антропогенная деградация растительности усилила здесь фактор радиационного терморегулирования.

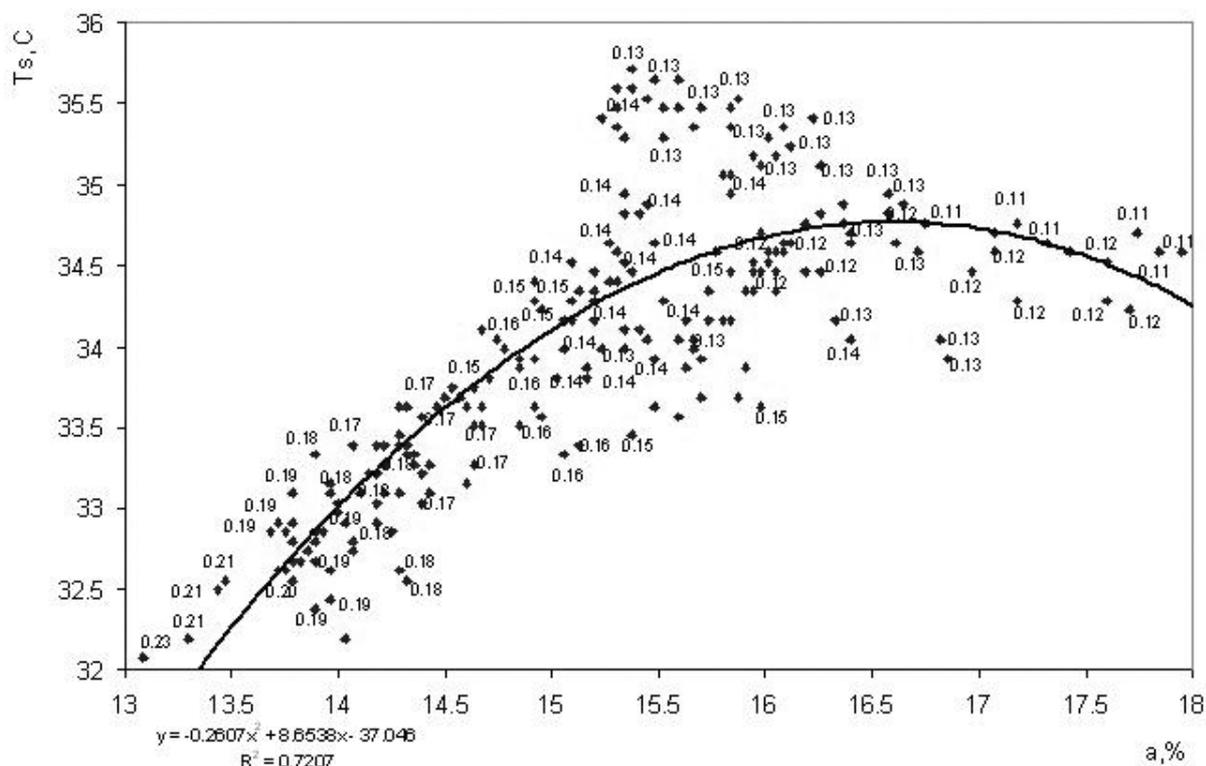


Рис. 3. Соотношение между месячными значениями альбедо и температурой поверхности. Территория: 45-47° с.ш., 45-47° в.д. Около точек проставлены месячные значения NDVI AVHRR. Период: май-сентябрь 1985-2004 гг. Исходные данные из работы [18]. Зоны растительности: сухая степь (NDVI более 0.19), полупустыня (NDVI менее 0.19)

Рассмотрим проявление факторов терморегулирования на примере сухой степи и полупустыни Северо-Западного Прикаспия (рис. 3). Эта территория также подвержена антропогенному опустыниванию. Ее зеленая фитомасса выше, чем в Волго-Уральском междуречье. Максимальные значения альбедо не превышают 18%, а температуры поверхности - 36°C и они ниже, чем на трансекте. На территории преимущественное значение имеет фактор эвапотранспирационного терморегулирования. Фактор радиационного терморегулирования проявляется локально при значениях альбедо NDVI 0.11-0.12. Обращает на себя внимание повышение температуры поверхности в пикселах с NDVI=0.13 в диапазоне альбедо 15.5-16%, а также их разброс в диапазоне почти 2°C. Подобная пространственная изменчивость температуры объясняется наличием пикселов с высокой мозаичностью растительного покрова (участки с высокой фитомассой перемежаются с участками с изреженной растительностью в результате перевыпаса) и пикселов с более равномерным распределением фитомассы.

Географический подход позволяет дифференцировать засушливые земли по факторам терморегулирования, проявляющих себя по-разному в зависимости от зональности растительности. Если принять во внимание разработанную для крупных аридных регионов гипотезу климатического опустынивания [17], смена факторов терморегулирования поверхности является основанием переключения обратных связей альбедо-осадки. В основе положительной обратной связи лежит доминирование радиационного терморегулирования, а отрицательной – доминирование эвапотранспирационного. Переключение отрицательной обратной связи на положительную, поддерживающую опустынивание, вероятно при пороговом значении зеленой фитомассы менее 0.5 т/га или ее индикаторе NDVI AVHRR менее 0.07.

Предыдущий анализ показывает, что радиационное терморегулирование на рассматриваемых территориях выражено локально и отмечается при более высоких значениях NDVI. Оно скорее связано с антропогенной деградацией растительности, фитомасса которой еще не деградирована до порогового значения. В итоге эта территория в многолетнем режиме не входит в сферу действия положительной обратной связи альбедо-осадки. Она подвержена в основном антропогенному опустыниванию.

Таким образом, растительные зоны могут служить индикатором факторов терморегулирования поверхности. В северной пустыне в отличие от среднеазиатских пустынь возникают более слабые предпосылки для доминирования радиационного терморегулирования. Их формирование в значительной степени связано с антропогенной деградацией растительности. В данных условиях фактор радиационного терморегулирования может быть недостаточными для устойчивого поддержания аридизации климата в многолетнем режиме.

Объяснение положительной корреляции между альбедо и температурой поверхности

Теоретическое объяснение возникновения положительной корреляции между альбедо и температурой поверхности было впервые дано Idso [9]. Оно базируется на уравнении теплового баланса, выраженном через разность температуры поверхности t_s и температуры воздуха t_a :

$$t_s - t_a = r_a / \rho c_p (R_N - G) - \lambda \varepsilon / P c_p (c / (r_a + c))(e_s^* - e_a), \quad (1)$$

где R_N - радиационный баланс, G - поток тепла в почву, ρ - плотность воздуха, c_p - удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, P - атмосферное давление воздуха, ε - отношение молярного веса воды к воздуху, λ - удельная теплота парообразования, r_a - аэродинамическое сопротивление потоку в слое воздуха между поверхностью и высотой измерения t_a и парциального давления водяного пара e_a , r_s - диффузное сопротивление поверхности, e_s^* - давление насыщенного водяного пара при температуре поверхности t_s .

Для условия отсутствия испарения (выравнивание e_a и e_s^* , или приближение r_s к бесконечности) уравнение (1) имеет вид:

$$t_s - t_a = r_a / \rho c_p (R_N - G) \quad (2)$$

В период падения транспирации и испарения с поверхности почвы R_N снижается вследствие повышения альбедо почвы, а G возрастает. В результате разность $R_N - G$ уменьшается, как предполагается в модели общей циркуляции Charney, 1975.

В этот период аэродинамическое сопротивление r_a должно быть значительным:

$$r_a = 4,72 [\ln(z/z_0)]^2 / (1 + 0,54v), \quad (3)$$

где z - расстояние от слоя вытеснения до высоты измерения, z_0 - аэродинамический параметр шероховатости поверхности, v - скорость ветра на высоте z .

В начале периода изреживания растительного покрова z_0 составляет примерно $0.1h$, где h - средняя высота растительного покрова и неровностей поверхности. К концу данного периода z_0 резко падает и приводит к увеличению r_a на порядок или более. До тех пор пока r_a возрастает, оно на порядок величины перекрывает уменьшение разности $R_N - G$ и ведет к повышению температуры поверхности. Таким образом, в период падения эвапотранспирации, вызванной деградацией растительного покрова, происходит значительное повышение поверхности.

Позднее была предложена линейная статистическая модель формирования положительной корреляции между альбедо и температурой поверхности [19]. Применительно к большой неоднородной территории с участками с растительностью и без растительности температуру поверхности t_s и альбедо a_s можно представить в виде:

$$t_s = ft_v + (1-f)t_0 \quad (4)$$

$$a_s = fa_v + (1-f)a_0, \quad (5)$$

где f обозначает долю площади с растительным покровом, t_v и a_v - значения температуры и альбедо участков с растительным покровом, а t_0 и a_0 - значения температуры и альбедо участков без растительности. При исключении f из уравнений (4) и (5) совместное их решение имеет вид:

$$t_s = a + ba_s, \quad (6)$$

где $a = (a_0t_v - a_vt_0)/(a_0 - a_v)$ и $b = (t_0 - a_0)/(a_0 - a_v)$.

Соотношение (6) имеет линейный вид. Разброс значений вокруг линии регрессии будет показателем изменчивости температуры и альбедо внутри участков с растительностью и без растительности.

Заключение

Факторы терморегулирования поверхности проявляются при анализе осредненных спутниковых данных альбедо и температуры на территории Северного Прикаспия. Географический подход позволяет дифференцировать засушливые земли по факторам терморегулирования - радиационному и эвапотранспирационному. Распределение факторов терморегулирования на территории соответствует растительным зонам. Эвапотранспирационный фактор преобладает на большей части исследуемых засушливых земель. Проявление радиационного фактора терморегулирования в значительной степени обусловлено антропогенной деградацией растительности. Локальность радиационного фактора терморегулирования на территории позволяет сделать вывод о доминировании антропогенной составляющей опустынивания по отношению к природной.

Литература

1. *Thorntwaite C.W.* An approach toward a rational classification of climate // *Geog. Rev.*, 1948. Vol.38. No.1. P.55-94.
2. UNCCD: United Nations Convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and desertification, particularly in Africa. Geneva, 1994.
3. *Becker F., Bolle H.J., Rowntree P.R.* The International satellite land-surface climatology project. - Berlin: Free Univ. press, 1988. 100 p.
4. *Charney J.G.* Dynamics of deserts and drought in Sahel // *Quart. J. Royal. Meteorol. Soc.* 1975. Vol.101. No. 0428. P.193-202.
5. *Jackson R.D., Idso S.B.* Surface albedo and desertification // *Science*. 1975. Vol.189. P.369-370.
6. *Ripley E.A.* Comment on the Paper by J.G. Charney 'Dynamics of deserts and drought in Sahel' *Quart. J. Royal. Meteorol. Soc.* 1976. Vol.102. P.466-467.
7. *Ripley E.A.* Drought in the Sahara: Insufficient biogeophysical feedback // *Science*. 1976. V.191. P.100.
8. *Idso S.B.* A note on some recently proposed mechanisms of genesis of deserts // *Quart. J. Royal. Meteorol. Soc.* 1977. Vol.103. P. 369-370.
9. *Idso S.B.* Surface energy balance and genesis of deserts // *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.* Ser. A. 1981. Vol.30. P.253-260.
10. *Wendler G., Eaton F.* On the desertification of the Sahel sone: Part 1. Ground observations // *Climate Change*.1983.No.4. P.365-380.
11. *Goward S.N., Cruickshanks G.D., Hope A.S.* Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape // *Remote Sens. Environ.* 1985. Vol. 18. P.137-146.
12. *Otterman J., Tucker C.J.* Satellite measurements of surface albedo and temperatures in semi-desert // *J. Climate and Appl. Meteor.* 1985. Vol. 24. No.3. P.228-235.
13. *Золотокрылин А.Н.* Связь альbedo и температуры поверхности суши в аридных областях // Матер. метеорол. исслед. Междувед. Геофиз. Ком. АН СССР. 1986. №10. С.38-45.
14. *Vukovich F.M., Toll D.L., Murphy R.E.* Surface temperature and albedo relationship in Senegal derived from NOAA-7 satellite data // *Remote Sens. Environ.* 1987. Vol. 22. P. 413-421.
15. *Seguin B., Assad E., Freteaud J.P. et al.* Suivi du bilan hydrique a l'aide de la teledetection par satellite: Application au Senegal. Bruxelles, 1987. (Rep. to the EEC-DG8).
16. *Menenti M.W., Bastiaassen D., van Eyck, Abdel Karim M.A.* Linear relationships between surface reflectance and temperature and their application to map actual evaporation of groundwater // *Adv. Spase Res.* 1988. Vol.9. P.165-176.
17. *Золотокрылин А.Н.* Климатическое опустынивание. М.: Наука, 2003. 246 с.
18. *Gutman G., Tarpley D., Ignatov A., Olson S.* Global land products from AVHRR: The enhanced NOAA GVI dataset // *Bull. Amer. Met. Soc.* 1995. 76. P.1141-1156.
19. *Avisar R., Pielke R.A.* A parameterization of heterogeneous land surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology // *Month. Weather Rev.* 1989. Vol.117. P.2113-2136.

Factors of regulation of the dry lands surface temperature using global AVHRR-derived land climatology

A.N. Zolotokrylin

Institute of Geography Russian Academy of Sciences

Global AVHRR-derived land climatology (monthly mean calibrated albedos and temperatures, NDVI) have been used to investigate relations between albedo and surface temperature in North Nearcasian. Positive and negative correlation between albedo and surface temperature depending on vegetation zones have been found. There was negative correlation (the radiation regulation) in desert vegetation and there was positive correlation (the evapotranspiration regulation) in semi-desert vegetation and steppe vegetation. Man-induced degradation of semi-desert vegetation accelerates the radiation regulation. Threshold value for NDVI beyond which the evapotranspiration regulation switches to the radiation one has been found.

Keywords: albedo, surface temperature, NDVI AVHRR, dry lands, radiation/evapotranspiration regulation.