

Тренды увлажнения и биофизических параметров засушливых земель европейской части России за период 2000–2014 гг.

А.Н. Золотокрылин, Т.Б. Титкова, Е.А. Черенкова, В.В. Виноградова

*Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru*

Анализируются коэффициенты линейного тренда индексов увлажнения и биофизических параметров (данные MODIS) на засушливых землях Европейской части России. Уменьшение увлажнения засушливых земель было неоднородным: в наибольшей степени оно снизилось на территории степных пастбищ, а в наименьшей – пустынных. Иссущение не затронуло пустынные районы вблизи Каспийского моря. Изменения на территории биофизических параметров обусловлены в первую очередь региональным изменением увлажнения. Одновременно антропогенные изменения пастбищ усиливают изменения биофизических параметров. Ухудшение условий вегетации (VCI) и рост альбедо отмечалось на большей части территории, за исключением районов вблизи Каспийского моря. Районы падения NDVI, сопряженные с районами повышения температуры поверхности, локализируются севернее пустынных пастбищ. Локальные очаги снижения NDVI на левом и правом берегу Волги отмечались в массивах трансформированной степной растительности в результате перевыпаса, при этом наибольшее падение NDVI зарегистрировано в очагах максимального роста альбедо. Установлено территориальное подобие коэффициентов линейного тренда NDVI и температуры поверхности.

Ключевые слова: засушливые земли, осадки, SPI, MODIS, альбедо, температура поверхности, NDVI, VCI, SCEI

Введение

Засушливые земли (аридные, семиаридные и сухие субгумидные) расположены на юго-востоке Европейской части России и простираются вплоть до государственной границы. Они используются в основном как сухостепные и пустынные пастбища и испытывают антропогенную нагрузку – перевыпас. Изолиния коэффициента увлажнения (отношение годовой суммы осадков к годовой потенциальной эвапотранспирации), равная 0,65, считается северной границей этих земель (UNCCD, 1993).

Состояние пастбищ определяется их увлажнением и антропогенной нагрузкой. Осредненный по территории коэффициент увлажнения имеет значимый положительный линейный тренд за период 1951–2013 гг. (Золотокрылин и др., 2014). Но в последнее десятилетие отмечалось несколько обширных засух, вызвавших снижение увлажнения на фоне сохраняющейся антропогенной нагрузки. В результате изменились биофизические параметры (альбедо, температура поверхности, NDVI, влажность почвы) пастбищ. Диагноз территориальных особенностей изменения биофизических параметров позволяет оценить состояние пастбищ в условиях снижения увлажнения и сохраняющейся антропогенной нагрузки.

Цель статьи состоит в установлении территориальных особенностей изменения увлажнения и биофизических параметров засушливых земель по климатическим и MODIS-данным. Задача включает оценку линейных трендов метеорологического и спутникового индексов увлажнения, а также биофизических параметров.

Материалы и методика

К засушливым землям относятся сухостепные, полупустынные и отчасти пустынные ландшафты в Ростовской, Волгоградской, Астраханской, Саратовской, Оренбургской областях и Республики Калмыкия общей площадью более 0,5 млн. кв. км. (Золотокрылин, Черенкова, 2009). В пределах засушливых земель для исследования были выбраны пастбищные территории Северо-Западного Прикаспия (44–51° с.ш., 44–51° в.д.) и Кумо-Манычской впадины (45–47,5° с.ш., 40–46° в.д.).

Стандартизованный индекс осадков (Standardized Precipitation Index, SPI) применен для описания изменения осадков на территории (ВМО, 2012). Величины осадков нормализуются посредством использования функции распределения вероятностей так, чтобы значения SPI фактически рассматривались в качестве стандартных отклонений от среднего значения. Положительные значения SPI указывают на объем осадков выше среднего, а отрицательные значения – на объем осадков ниже среднего. Значения $1 < \text{SPI} > -1$ считаются близкими к норме. SPI рассчитывается для разных временных масштабов: от 1 до 12 месяцев. В работе используется 3-х месячный SPI. Данные SPI в узлах координатной сетки разрешения $1^\circ \times 1^\circ$ – можно найти в глобальном архиве ежемесячных данных Национального центра атмосферных исследований США (McKee et al., 1993).

Спутниковые индексы увлажнения представлены построенными по данным MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) индексом климатических экстремумов увлажнения (Satellite Climatic Extremes Index, SCEI) (Золотокрылин, Титкова, 2012) и индексом вегетационных условий (Vegetation Condition Index, VCI) (Kogan, 1992). Проведено сравнение SPI со спутниковым индексом климатических экстремумов увлажнения с оценкой степени их коррелированности, которая достаточно тесная.

Данные MODIS представлены средними значениями за 16 дней альбедо (A), температуры поверхности (Ts), вегетационного индекса (NDVI) (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products/) центра LP DAAC NASA: LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER. Все параметры имеют разрешение $0,05^\circ \times 0,05^\circ$, что примерно соответствует 5×5 км.

Альбедо (BRDF-Albedo Model Parameters 16-Day L3 0.05 Deg CMG) определялось по модели MCD43 C1 версии 005 с дискретностью 16 дней. В данной версии объединены данные спутников MODIS/Terra + Aqua BRDF/Albedo.

Значения индекса растительности NDVI (Vegetation Indices Monthly L3 Global 0,05 Deg CMG) были получены по данным MODIS/Terra модели MOD13C1 – версии 005 с шагом в 16 дней.

Температура поверхности (Land Surface Temperature and Emissivity Monthly L3 Global 0,05 Deg CMG) определялась по модели MOD11 C2 версии 005 по данным спутника MODIS/Terra с периодичностью 8 дней. По двум 8-ми дневным срокам вычислялось среднее за период 16 дней, идентичным периодам для альбедо и NDVI.

Оценка аномалий влажности почвы в период с мая по август выполнена с использованием среднемесячных данных суммарного водного эквивалента ($\text{кг}/\text{м}^2$) пространственного

разрешения $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ гидрологической модели Noach 2.7.1 Global Land Data Assimilation System (GLDAS) эксперимента Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) (Rodell et al., 2004). Данные суммарного водного эквивалента получены на основе спутниковых измерений изменений в гравитационном поле Земли и их устойчивой связи с изменениями массы и не требуют дополнительной калибровки.

В качестве меры интенсивности изменений индексов и MODIS-данных за интервал времени 2000–2014 гг. используется коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость изменений. Для оценки статистической значимости тренда используется 5%-ный уровень значимости.

Результаты и их обсуждение

Территориальное изменение увлажнения имеет следующие особенности. Как показывает распределение коэффициента линейного тренда SPI, на большей части территории отмечалось иссушение (рис. 1а). Оно почти не затронуло прилегающую к Каспийскому морю территорию пустынных пастбищ. Наибольшее иссушение наблюдалось на территории степных пастбищ с очагом на правом берегу Волги вблизи 50° с.ш.

Если по данным SPI атмосферное увлажнение снижалось преимущественно на территории степных пастбищ, то максимальное иссушение почвы наблюдалось на стыке степных и пустынных пастбищ (рис. 1б). Очаг максимально интенсивного иссушения локализуется в северной части пустыни и частично в южной части степной зоны. Скорость иссушения почвы меньшей интенсивности охватывает все засушливые земли. Интенсивность иссушения уменьшается как по направлению к Каспийскому морю, так и в западном направлении. Сравнение рис. 1а и 1б показывает, что распределение на территории коэффициентов трендов аномалий влажности почвы не строго подобно распределению SPI.

Таким образом, уменьшение увлажнения засушливых земель было неоднородным. В наибольшей степени оно снизилось в степных пастбищах, а в наименьшей степени – пустынных. Этот результат независимо подтверждается территориальным распределением коэффициентов линейного тренда спутникового индекса климатических экстремумов (SCEI), рассчитанного по данным MODIS (рисунок не приводится).

Распределение на территории тренда VCI (рис. 2а) не противоречит изменениям увлажнения, т.е. условия вегетации были наихудшими в северо-восточной части степных пастбищ и в восточной части пустынных. Умеренное ухудшение условий вегетации наблюдалось как в степи, так и пустыне в северной половине Калмыкии. Условия вегетации были стабильными или даже локально улучшались в пойме Волги, на юге Биосферного заповедника и на побережье Каспийского моря (рис. 2а).

Значимое снижение вегетационного индекса наблюдалось только на территории степных пастбищ, которое не вышло за пределы засушливых земель (рис. 2б). Распределение на территории локальных очагов снижения NDVI соответствуют скорее изменению SPI,

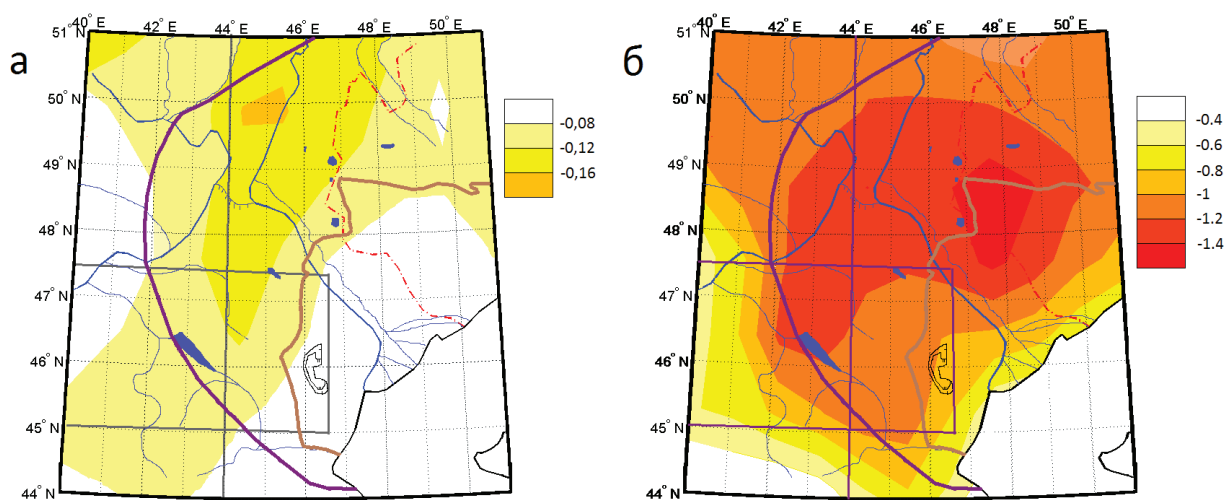


Рис. 1. Коэффициенты линейного тренда, май–август: а) стандартизованный индекс осадков (SPI), 2000–2012. Изменения SPI (отн. ед./год) значимы при значениях менее -0,08; б) аномалии влажности почвы с мая по август в период 2001–2014 гг. по сравнению с 2003–2007 гг. Изменения аномалий влажности почвы (г/м²) значимы при значениях больше (меньше) $\pm 0,8$

Прямоугольники – территории исследования: большой (Северо-Западный Прикаспий), маленький (Кумо-Маньчская впадина). Прерывистая красная линия – государственная граница. Коричневая линия – граница пустынной растительности (Сафронова, 2002). Фиолетовая линия – граница засушливых земель. На юго-западе пустыни контуром выделен Биосферный заповедник «Черные Земли»

чем распределению аномалий влажности почвы. Снижение NDVI на территории мозаично, что вызвано антропогенным воздействием (перевыпасом). Так, локальные очаги падения NDVI на левом и правом берегу Волги сопряжены с массивами трансформированной растительности в результате перевыпаса (Сафронова, 2002; Кулик и др., 2013), а распределение локальных очагов в Калмыкии не противоречит «Карте пастбищ в состоянии «норма» и «деградированные» (совокупность экологических уровней деградации «риск», «кризис», «бедствие») из работы (Золотокрылин и др., 2014).

Альbedo обладает более высокой чувствительностью к увлажнению засушливых земель, чем температура поверхности (рис. 3а). Как видно из рис. 3а, площадь со значимым повышением альbedo превышает соответственно площадь с температурой поверхности. Локальные максимумы альbedo (более 0,06) на правом берегу Волги севернее границы пустынных пастбищ обусловлены не только иссушением почвы, но и высоким уровнем деградации пастбищ. В очагах максимумов альbedo отмечалось падение NDVI (рис. 2б). Важно отметить локальное снижение альbedo в районе Биосферного заповедника и в южной части Северо-Западного Прикаспия, примыкающей к Каспийскому морю (рис. 3а). В этом же районе отмечалось улучшение условий вегетации (рис. 2а).

Положительные коэффициенты тренда температуры поверхности наблюдались преимущественно в северной части степных пастбищ, за исключением двух районов в восточной

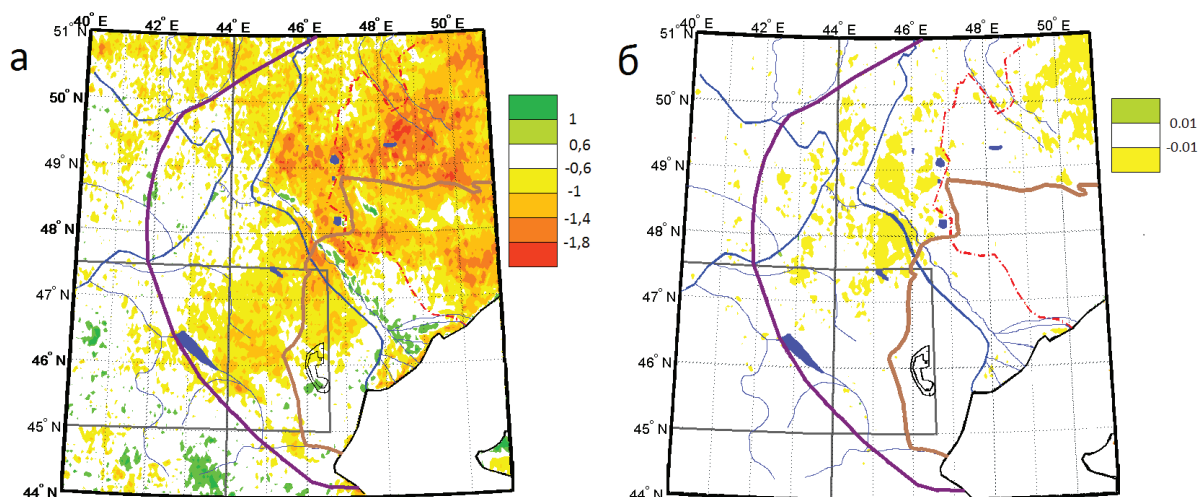


Рис. 2. Коэффициенты линейного тренда, май-август, 2000–2014 гг.:
 а) индекс вегетационных условий (VCI). Изменения VCI значимы при значениях более (менее) $\pm 0,6$; б) вегетационный индекс (NDVI) в долях единицы. Изменения значимы при значениях NDVI более (менее) $\pm 0,01$; Остальные обозначения см. рис. 1

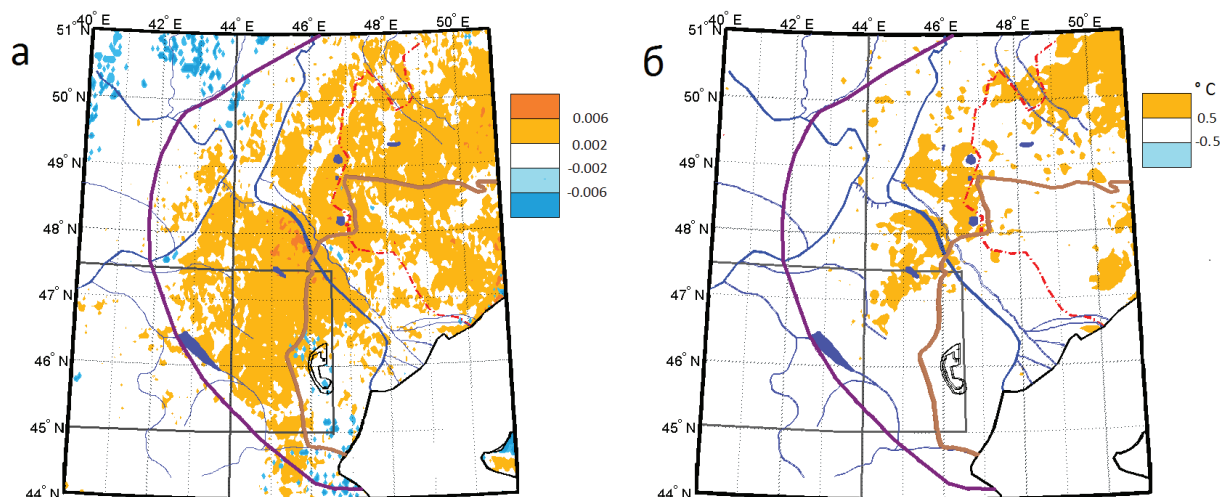


Рис. 3. Коэффициент линейного тренда (1/год); май-август 2000–2014 гг.:
 а) альbedo (A) в долях единицы, изменения значимы при значениях A более (менее) $\pm 0,02$;
 б) температура поверхности (T_s) в $^{\circ}\text{C}$, изменения значимы при значениях T_s более (менее) $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Остальные обозначения см. рис. 1

части пустынных пастбищ (рис. 3б). В работе (Золотокрылин и др., 2014) была установлена высокая отрицательная корреляция между NDVI и температурой поверхности степных пастбищ разной степени деградации. Это видно из сравнения рис. 2б и 3б, которое демонстрирует подобие территориальных изменений этих параметров.

Так как корреляционная связь между альbedo и температурой поверхности преимущественно положительная на территории степных пастбищ (эвапотранспирационный тип регулирования температуры поверхности), а на пустынных пастбищах – отрицательная (ра-

диационный тип) (Золотокрылин и др., 2014), то этим обстоятельством можно объяснить несовпадение территориальных изменений этих параметров.

Таким образом, изменения биофизических параметров обусловлены в первую очередь региональным изменением увлажнения территории. Одновременно антропогенные изменения пастбищ усиливают изменения биофизических параметров.

Заключение

Установлены территориальные особенности изменения увлажнения и биофизических параметров засушливых земель Европейской части России по климатическим и MODIS данным за период 2000–2014 гг. Уменьшение увлажнения засушливых земель было неоднородным: в наибольшей степени оно снизилось на территории степных пастбищ, а в наименьшей – пустынных. Изменения на территории влажности почвы не строго подобно изменению осадков (SPI).

Распределение на территории локальных очагов падения NDVI соответствует скорее изменению SPI, чем распределению аномалий влажности почвы. Локальные очаги снижения NDVI на левом и правом берегу Волги сопряжены с массивами трансформированной растительности в результате перевыпаса, при этом наибольшее падение NDVI отмечалось в очагах максимального роста альбедо. Установлено подобие территориальных изменений NDVI и температуры поверхности.

Изменения на территории биофизических параметров обусловлены в первую очередь региональным изменением увлажнения. Одновременно антропогенные изменения пастбищ усиливают изменения биофизических параметров.

Литература

1. ВМО. Всемирная Метеорологическая Организация. Свобода М., Хайес М. и Вуд Д. Руководство для пользователей стандартизованного индекса осадков. ВМО-№ 1090, Женева. 2012. 26 с.
2. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. Площадь засушливых земель равнин России // Аридные экосистемы. 2009. Т. 15. №1 (37). С. 5-12.
3. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых земель // Аридные экосистемы. 2012. Т. 18. № 4 (53). С. 5-12.
4. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А. Увлажнение засушливых земель Европейской территории России: настоящее и будущее // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 2(59). С. 5–12.
5. Золотокрылин А.Н., Трофимов И.А., Титкова Т.Б. Оценка экологического состояния «норма» аридных пастбищ по геоботаническим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2014. Т. 11. № 2. С. 197-207.
6. Кулик К.Н., Рулев А.С., Юферев В.Г. Геоинформационный анализ очагов опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 3 (56). С. 91-98.
7. Сафронова И.Н. Фитоэкологическое картографирование Северного Прикаспия // Геоботаническое картографирование 2001-2002. СПб. 2002. С. 44-65.
8. Kogan F.N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas // Intern. J. Remote Sens. 1992. Vol. 7. P. 1405-1419.
9. McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist. Drought monitoring with multiple time scales. // Proceedings of the Proc. Ninth Conference on Applied Climatology. Amer. Meteor. Soc. Dallas 1993. TX. P. 233-236.
10. Rodell M, P. R. Houser; U. Jambor; J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll. The Global Land Data Assimilation System. Bulletin of the American Meteorological Society. 2004 Vol. 85 (3). P. 381-394.
11. UNCCD. United Nations Convention on Combating Desertification. Bonn, 1993. Germany.

Trends of moisture indexes and biophysical parameters of European Russia drylands for the period of 2000–2014

A.N. Zolotokrylin, T.B. Titkova, E.A. Cherenkova, V.V. Vinogradova

Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru

In this paper, evaporation indexes and bio-physic parameters (MODIS data) linear trends coefficients for drylands of the European part of Russia are analyzed. The decrease in dryland moistening is irregular, it is more evident in steppe pastures, and less evident in desert areas. The desert areas near the Caspian Sea are not touched by the drying up. Changes in bio-physical parameters on the study territory are caused, first of all, by regional-scale moistening alteration. Concurrently, anthropogenic changes on pastures areas intensify the changes of bio-physical parameters. Vegetation condition (VCI) degradation and albedo growth are noted on the most part of study territory, except for the area near the Caspian Sea. Areas of NDVI decline, connected with areas of surface temperature growth, are localized north to the desert pastures area. Local nidi of NDVI decrease at left right sides of the Volga river are related to the ranges of steppe flora transformed as a result of overgrazing. Also, the territorial similarity between NDVI linear trends coefficients and surface temperature is defined.

Keywords: drylands, precipitation, SPI, MODIS, albedo, surface temperature, NDVI, VCI, SCEI

References

1. Standardized Precipitation Index User Guide. World Meteorological Organization, 2012: M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood (WMO-No. 1090), Geneva, Switzerland, 26 p.
2. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Ploshchad' zasushliviyykh zemel' ravnin Rossii (Area of Russia's dryland plains), *Aridnye ekosistemy*, 2009, Vol. 15, No. 1 (37), pp. 5–12.
3. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. Sputnikovyi indeks klimaticheskikh ekstremumov zasushliviyykh zemel' (Satellite index of dryland climate extremes), *Aridnye ekosistemy*, 2012, Vol. 18, No. 4 (53), pp. 5–12.
4. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Uvlazhnenie zasushliviyykh zemel' Evropeiskoi territorii Rossii: nastoyashchee i budushchee (Humidification of drylands in European Russia: the present and future), *Aridnye ekosistemy*, 2014, Vol. 20, No. 2(59), pp. 5–12.
5. Zolotokrylin A.N., Trofimov I.A., Titkova T.B. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya «norma» aridnykh pastbishchpo geobotanicheskim i MODIS dannym (Ecological conditions estimation: “normal” arid pastures by MODIS and geobotanical data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 197–207.
6. Kulik K.N., Rulev A.S., Yuferev V.G. Geoinformatsionnyi analiz ochagov opustynivaniya na territorii Astrakhanskoi oblasti (Geoinformation analysis of desertification areas in the Astrakhan Region), *Aridnye ekosistemy*, 2013, Vol. 19, No. 3 (56), pp. 91–98.
7. Safronova I.N. In: *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, 2001–2002, Saint-Petersburg, 2002, pp. 44–65.
8. Kogan F.N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas, *Intern. J. Remote Sens.*, 1992, Vol. 7, pp. 1405–1419.
9. McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, Drought monitoring with multiple time scales. Proceedings of the Proc, *Ninth Conference on Applied Climatology*, Amer. Meteor. Soc. Dallas 1993, TX, pp. 233–236.
10. Rodell M., P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalck, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, D. Toll, The Global Land Data Assimilation System, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, Vol. 85 (3), pp. 381–394.
11. UNCCD, United Nations Convention on Combating Desertification, Bonn, 1993, Germany.