

## Спутниковый индекс для оценки климатических экстремумов на засушливых землях (на примере Кумо-Манычской впадины)

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

Институт географии РАН  
119017 Москва, Старомонетный пер., 29  
E-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru

Предлагается спутниковый индекс для детектирования климатических экстремумов (Satellite Climatic Extremes Index, SCEI) – засух и переувлажнения после обильных осадков на засушливых землях. SCEI представляет собой сумму отклонений от многолетнего среднего альбедо и температуры поверхности, NDVI, влажности почвы, нормированных на среднеквадратическое отклонение. Обсуждаются особенности его использования для изучения динамики опустынивания на примере Кумо-Манычской впадины.

**Ключевые слова:** спутниковый индекс климатических экстремумов, засуха, переувлажнение, альбедо и температура поверхности, NDVI, влажность почвы, MODIS, засушливые земли, Кумо-Манычская впадина.

### Введение

В условиях меняющегося климата возможность увеличения экстремальности климата, особенно в районах недостаточного и неустойчивого увлажнения, вызывает особую озабоченность. Экстремальность климата засушливых земель обусловлена в основном экстремальностью осадков. Она проявляется чаще всего в повторяющихся засухах и реже в обильных осадках, вызывающие кратковременное переувлажнение почвы. Пространственно-временная изменчивость этих экстремумов влияет на биофизические тенденции, которые наряду с социально-экономическими, важны для понимания причин опустынивания и его последствий.

Дискуссия в научных кругах по вопросу возможности применения спутниковой информации для выявления и мониторинга засушливых/переувлажненных периодов с учетом их экстремальности, а также прогнозирования их изменчивости ведется достаточно давно. Опыт применения спутниковых биофизических параметров накоплен в основном в области детектирования засух в региональном и глобальном масштабах. Вначале был предложен индекс вегетационных условий (VCI), как функция нормированного разностного вегетационного индекса (NDVI), а несколько позднее индекс температурных условий (TCI), как функция температуры поверхности, и, наконец, комбинация VCI и TCI – индекс состояния (здравья) вегетации (VHI) (Kogan, 1990, 1995). Вскоре стали известны другие индексы засухи, построенные на комбинации альбедо и температуры поверхности или NDVI и альбедо (Ghulam et al., 2004). Интересен опыт спутникового мониторинга воздействия засухи 2010 г. на растительность Европейской России (Савин и др., 2011). Но до сих пор не было предложено универсального спутникового индекса для одновременного детектирования противоположных по знаку климатических экстремумов – засух и переувлажнений применительно к засушливым землям. Исследование возможности сочетать все известные на текущий момент типы спутниковых данных, чувствительных к засушливым/переувлажненным периодам, в качестве компонентов универсального комбинированного индекса климатических экстремумов увлажнения, в особенности на засушливых землях, представляется весьма важным и своевременным.

Надежной информацией о климатических экстремумах становится спутниковый мониторинг таких биофизических параметров и их аномалий, как альбедо и температура поверхности, NDVI, влажность почвы (Soil Water Index, SWI). В настоящее время эти параметры,

за исключением влажности почвы, регулярно вычисляются с 2000 г. по данным спутниковых наблюдений радиометром MODIS. Спутниковый мониторинг SWI, начатый в Технологическом Университете Вены в 1992 г., продолжается по настоящее время, но доступные данные пока имеют ограниченный временной интервал.

Цель работы состоит в обосновании спутникового индекса климатических экстремумов (Satellite Climatic Extremes Index, SCEI), который по физическому смыслу может быть как отрицательным (засуха) или положительным (локальное и кратковременное переувлажнение). В работе предполагается детальное описание методики оценки SCEI и обсуждение особенностей его использования для изучения динамики опустынивания.

Тестирование предложенного в работе спутникового индекса SCEI выполнено на примере засушливых земель Кумо-Манычской впадины, отделяющей Предкавказье от степей и полупустынь юга. По данным спутниковых наблюдений за NDVI, альбедо, температурой поверхности и влажностью почвы в период 2000-2011 гг. на исследуемой территории предполагается: (1) оценить в заданные периоды вегетационного сезона распределение SCEI в 2010 г., известного как года с экстремальной засухой в Европейской России; (2) рассмотреть межгодовой ход площадей с положительными и отрицательными значениями SCEI и выявить их многолетнюю тенденцию; (3) выявить районы с максимальной повторяемостью положительных и отрицательных значений SCEI.

### Обоснование индекса и методика его оценки

Пространственно-временное изменение биофизических параметров засушливых земель прямым или косвенным образом отражает экстремальность климата, которая проявляется в отклонениях (аномалиях) от многолетнего среднего значений альбедо и температуры поверхности, NDVI, SWI. Например, на начальном этапе засухи возникает отрицательная аномалия влажности почвы и растения начинают испытывать недостаток влаги. На уровне растительной ассоциации из-за изменения физиологических процессов цвет ассимиляционных органов меняется в сторону пожелтения видов растений, наименее устойчивых к недостатку влаги. Возникает отрицательная аномалия NDVI, вызывающая положительную аномалию альбедо поверхности. Энергия, которая раньше тратилась на транспирацию и испарение почвы, расходуется на турбулентный прогрев воздуха и почвы. В результате формируется положительная аномалия температуры поверхности и воздуха. Таким образом, засуху можно выразить через индекс, который является отрицательной функцией аномалий биофизических параметров.

В период, когда осадки и влажность почвы выше среднемноголетних значений, для засушливых земель характерны положительные аномалии влажности почвы, NDVI и отрицательные аномалии альбедо и температуры поверхности. В этом случае индекс, как функция аномалий биофизических параметров, становится положительным.

Изложенное выше качественное объяснение индекса климатических экстремумов засушливых земель может быть formalизовано и представлено в виде:

$$SCEI_i = -(\Delta A_i / \sigma A + \Delta T_{s,i} / \sigma T_s) + \Delta NDVI_i / \sigma NDVI + \Delta SWI_i / \sigma SWI, \quad (1)$$

где  $\Delta A_i$  – аномалия альбедо за  $i$  год;  $\sigma A$  – среднеквадратическое значение альбедо за базовый период (в данном случае за 2000-2011 гг.);  $\Delta T_{s,i}$  – аномалия температуры поверхности за  $i$  год;  $\sigma T_s$  – среднеквадратическое значение температуры поверхности за базовый период;  $\Delta NDVI_i$  – аномалия NDVI за  $i$  год;  $\sigma NDVI$  – среднеквадратическое значение NDVI за базовый период;  $\Delta SWI_i$  – аномалия влажности почвы за  $i$  год;  $\sigma SWI$  – среднеквадратическое значение влажности почвы за базовый период.

По причине ограниченности временного интервала SWI-данных индекс SCEI1 был вычислен для мая и июня 2000 г. Для расчета спутникового индекса за весь период 2000–2011 гг. использовалась формула (1) без компонента влажности почвы:

$$SCEI2_i = -(\Delta A_i / \sigma A + \Delta T_{s,i} / \sigma T_s) + NDVI_i / \sigma NDVI. \quad (2)$$

Для выделения экстремумов временные ряды SCEI1 и SCEI2 были нормированы на среднеквадратическое отклонение. В этом случае анализировались только значения индекса менее -1 (засуха) и более 1 (переувлажнение).

Территория исследования охватывает целиком Кумо-Манычскую впадину с прилегающими к ней с севера и юга засушливыми землями и ограничена 45–47.5° с.ш. и 40–46° в.д. Она включает юго-восточную часть Ростовской области, северо-восток Краснодарского края, север Ставропольского края, а также западную часть Калмыкии. Кумо-Манычская впадина – уникальный природный регион, главная геолого-геоморфологическая структура на юге Европейской России, в геологическом прошлом представлявшая собой единую водную систему – пролив, соединявший Черное и Каспийское моря. Территория представлена субгумидными, сухими субгумидными и semiаридными и аридными землями. Здесь имеют зональное распространение средние (сухие) степи на каштановых почвах, южные (опустыненные) степи на светло-каштановых почвах, северные пустыни на бурых почвах и сельскохозяйственные земли на их месте. В регионе преобладают разнотравно-типчаково-ковыльные, типчаково-ковыльные, опустыненные полынно-типчаково-ковыльные степи. В Калмыкии представлена растительность северных пустынь.

В работе использованы данные альбедо, среднемесячной температуры поверхности, NDVI ([https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_products](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products)) Центра LP DAAC NASA: LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER. Все параметры имеют разрешение 0.05° x 0.05° (в среднем 5.6 x 5.6 км). Данные анализировались в период с 2000 по 2011 гг. за следующие сроки: 9–25 мая, 26 мая – 9 июня, 10–25 июня, 26 июня – 11 июля, 12–27 июля, 28 июля – 12 августа, 13–28 августа.

Данные альбедо (BRDF-Albedo Model Parameters 16-Day L3 0.05Deg CMG) предоставлены моделью MCD43 C1 версии 005 с дискретностью 16 дней. В версии этой модели объединены наиболее качественные данные спутников MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo. Значения индекса растительности NDVI (Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG) были получены по данным MODIS/Terra модели MOD13C1 – варианта 005 с шагом в 16 дней. Важно отметить, что во многих работах (Золотокрылин и др., 2000; Kogan, 1987; Kogan, 1997; Tucker et al., 1985; Tucker, Sellers, 1986) показано, что NDVI имеет высокую чувствительность к осадкам и коррелирует с запасами надземной фитомассы. Для среднемесячной температуры поверхности (Land Surface Temperature and Emissivity Monthly L3 Global 0.05 Deg CMG) использовалась модель MOD11 C2 версии 005, по данные спутника MODIS/Terra с периодичностью 8 дней. По двум 8 дневным срокам вычислялось среднее за период 16 дней, идентичный периодам, взятым для альбедо и NDVI.

Данные почвенной влажности получены из 2-х слойной модели TU-Wien пространственного разрешения 12.5 x 12.5 км (Bartalis at el., 2007), где 1-й слой представлен значениями влажности почвы на поверхности, сформированными на основе дистанционных материалов, содержащих информацию о коэффициентах обратного рассеяния радиометров, установленных на спутниках ERS-1 и ERS-2. Значения из 1-го слоя были приведены к единому углу наклона 40° и пересчитаны в относительные единицы (%) с учетом зависимости условий увлажнения почвы от географического местоположения. Полученные применением экспоненциальной функции к данным влажности почвы на поверхности данные 2-го слоя (индекс почвенной влаги SWI) показывают содержание воды в процентах в почвенной толще глубиной до 1 м. Ранее для равнинной территории юга Европейской России были

изучены изменения влажности почвы по спутниковым данным с мая по сентябрь в период 1992–2006 гг. (Черенкова, 2011).

Методика предусматривала оценку связи SCEI1 и SCEI2 с каждым входящим в индекс компонентом на примере мая и июня 2000 гг. Коэффициент корреляции индекса SCEI2 со всеми компонентами был примерно одинаков (0.7–0.8 по абсолютной величине), причем связь индекса была теснее с альбедо и NDVI, чем с температурой поверхности. Включение влажности почвы в расчет индекса SCEI1 уменьшало почти вдвое тесноту связи с альбедо, температурой поверхности, NDVI, при этом коэффициент корреляции влажности почвы с индексом не превышал 0.5. Можно предположить, что в формировании спутникового индекса климатических экстремумов более важны приповерхностные биофизические параметры, включая и влажность почвы. По этой причине корреляция влажности почвы в метровом слое с SCEI1 остается невысокой.

Вопрос валидации предложенного в работе индекса SCEI решался методом его сравнения с применяемым в практике Росгидромета России показателем увлажнения – гидротермическим коэффициентом Г.Т. Селянинова (ГТК), рассчитанным по наземным данным. Он представляет собой отношение суммы осадков в заданный период вегетации к уменьшенной в 10 раз сумме активных температур (более 10 °C) за этот же период. Физический смысл ГТК – это отношение осадков к испаряемости. Значения ГТК близкие к единице характеризуют оптимальное увлажнение. Уменьшение ГТК соответствует иссушению территории. Экстремумы увлажнения определялись из нормированных на среднеквадратическое отклонение аномалий ГТК. Для сравнения пространственного распределения значений  $\Delta\text{SWI}/\sigma\text{SWI}$  (в мае–июне 2000 г.) и SCEI (в мае–июне 2000 и 2010 гг.) с наземными данными были использованы месячные суммы осадков и аномалии ГТК на 11-ти метеостанциях, расположенных в Северо-Западном и Северном Прикаспии. Совпадение положительных экстремумов (переувлажнений) было в 83% случаев, а отрицательных (засух) в 91% случаев. Полученный результат повышает уверенность применения SCEI в оценке климатических экстремумов.

## Результаты

Вначале обсудим распределение на исследуемой территории  $\Delta\text{SWI}/\sigma\text{SWI}$  и месячной суммы осадков в мае 2000 г. (рис. 1а, б). Нормированный индекс влажности почвы представлен с шагом 0.5 градусов. Распределение влажности почвы не противоречит полю осадков, особенностью которого в этот период была положительная аномалия в южной части территории и близкие к норме осадки в северной. Положительный экстремум влажности почвы (значения больше 1) почти полностью перекрывается максимумом майских осадков. Также наблюдается сопряженное уменьшения влажности почвы и осадков на территории в северном направлении. В итоге сравнение рис. 1а и 1б свидетельствует о непротиворечивости распределения майских аномалий влажности почвы и осадков.

Распределение SCEI1 и SCEI2, представленное на рис. 1в, г, адекватно передает основные черты локализации очагов индексов. Учет влажности почвы детализирует очаги положительных экстремумов в районе повышенной влажности почв и слабо влияет на локализацию очагов отрицательных экстремумов. Важно отметить, что очаги положительного SCEI2 локализуются севернее района с максимальной влажностью почвы в метровом слое, что подчеркивает значение приповерхностных биофизических процессов в формировании климатических экстремумов (рис. 1в).

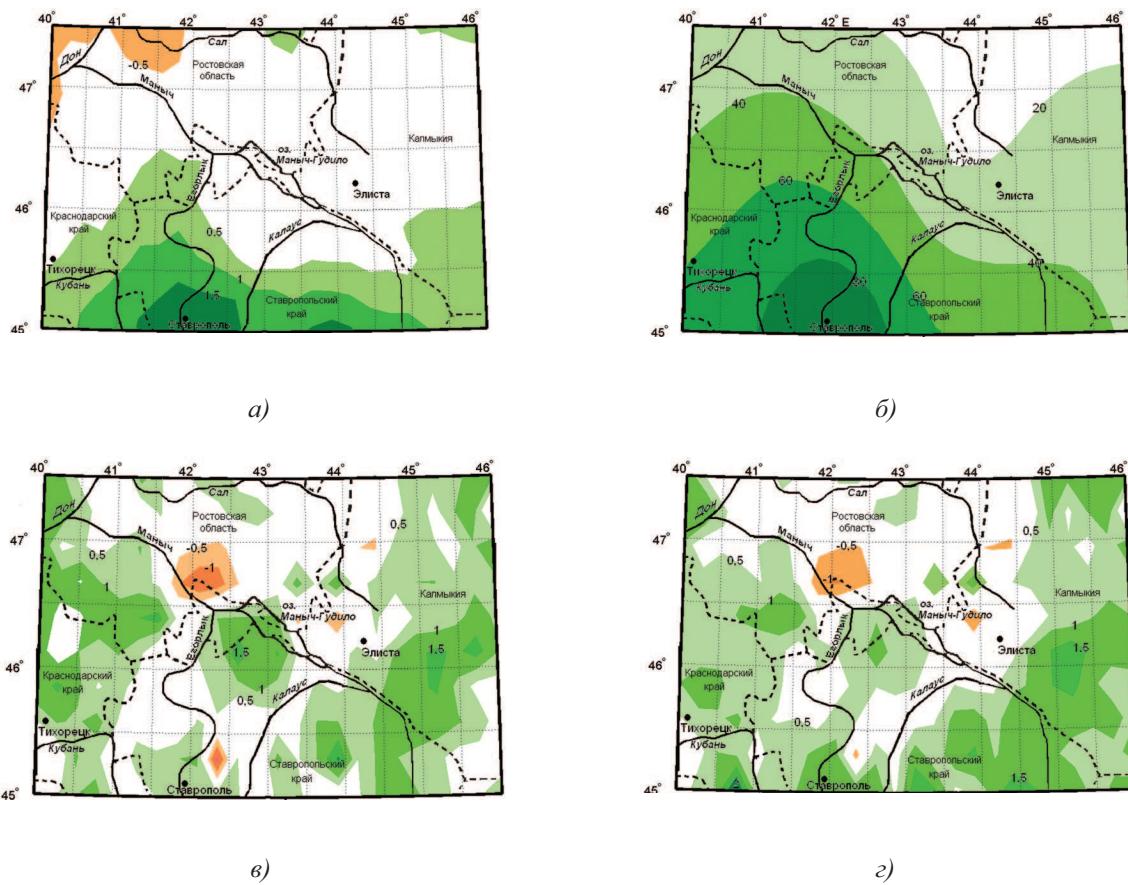


Рис. 1. Географическое распределение биофизических параметров на территории Кумо-Манычской впадины. Май 2000 г.

*а* - нормированная на среднеквадратическое отклонение аномалия индекса почвенной влаги *SWI*  
*б* - месячная сумма осадков в мм  
*в* - спутниковый индекс климатических экстремумов (*SCEI2*)  
*г* - спутниковый индекс климатических экстремумов (*SCEII*)

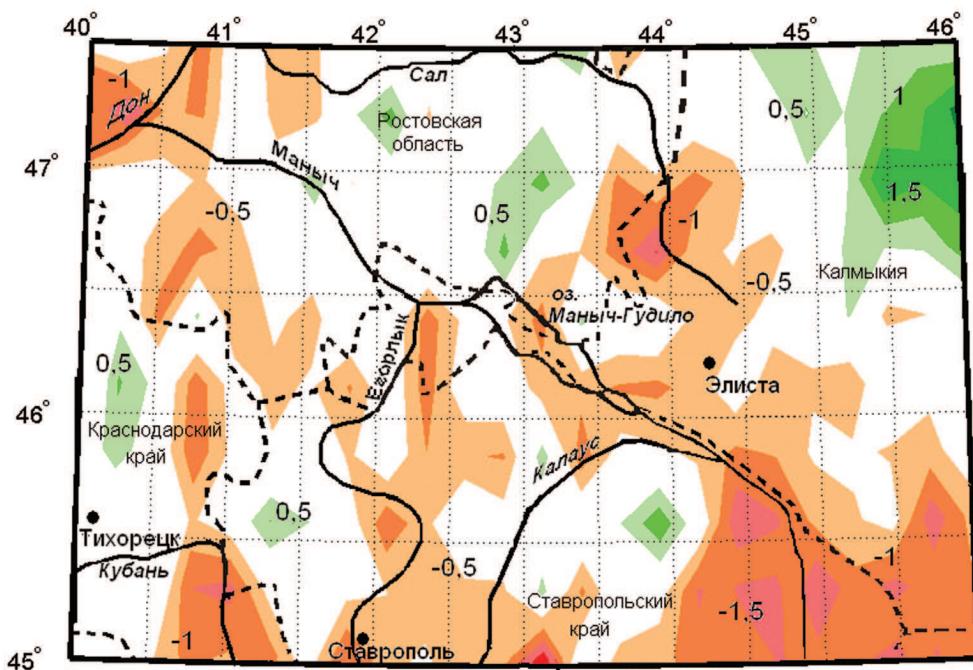


Рис. 2. Географическое распределение спутникового индекса климатических экстремумов (*SCEI2*) на территории Кумо-Манычской впадины. Май 2010 г.

Далее перейдем к анализу данных за 2010 г., чтобы уточнить время распространения обширной засухи на исследуемой территории. Анализ SCEI2 свидетельствует, что в мае и июне доминировали близкие к норме условия увлажнения (рис. 2). В южной части территории в мае наблюдались локальные очаги засух. Наибольший из них площадью около 15% возник на юго-востоке территории в Ставропольском крае и Калмыкии. Одновременно в мае на севере Калмыкии наблюдался очаг переувлажнения площадью около 20%. Ситуация почти не изменилась в июне. Только в июле засуха стала распространяться с севера на некоторые районы Ростовской области и Калмыкии. Таким образом, весна и начало лета в Кумо-Манычской впадине не были засушливыми. Засуха пришла с севера в середине лета.

Выясним теперь вопрос о межгодовом изменении площади SCEI2 за период 2000–2011 гг. В мае–июне на территории было две большие засухи: в 2003 и 2007 гг. (рис. 3). Первая была преимущественно весенней с охватом более 90% территории. В июне ее площадь сократилась до 53%. Вторая сформировалась в мае (40%), а в июне ее площадь возросла уже до 90% от всей территории. В 2010 г. локальные очаги засух по площади не превышали 20% в мае и июне. Эти две засухи определили знак тенденции площади засух, которая была отрицательной в мае и положительной в июне. Значимость линейных трендов в этом случае невелика.

Крупные очаги переувлажненных земель отмечались в мае в 2001 и 2011 гг. (охват 45%) (рис. 3), а в июне – в 2004 и 2008 гг. с площадью соответственно 40 и 32%. Линейные тренды указывают об очень слабой тенденции сокращения площади переувлажненных земель.

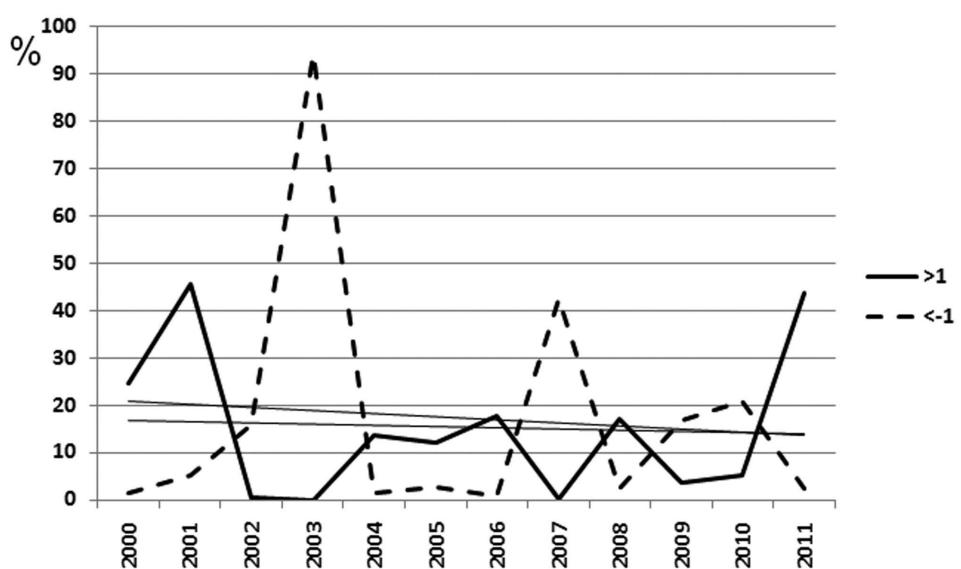


Рис. 3. Межгодовой ход площадей со спутниковым индексом климатических экстремумов (SCEI2) на территории Кумо-Манычской впадины. Май 2000–2011 гг.

Важно проследить изменение повторяемости SCEI2 от периода май–июнь 2000–2005 к периоду 2006–2011 гг. (рис. 4а, б). Отметим, что площадь с засухами возросла с 16% в первом периоде до 22% во втором. И, наоборот, площадь с переувлажненными землями уменьшилась с 20 до 12%. Размещение очагов засух и переувлажнения заметно менялось от первого периода ко второму. Повторяемость засух существенно возросла во второй период по отношению к первому. Кроме того, произошло смещение локализации очагов засух: в первый период отмечалась преимущественная локализация в южной половине территории, а во второй период засухи наблюдались преимущественно в северной половине. Если повторяемость засух в первый период не превышала 16% (в отдельных очагах 24%), то во второй период повторяемость возросла до 24%, а в очагах – до 40%.

Таким образом, с мая по июнь в период 2006–2011 гг. по отношению к периоду 2000–2005 гг. площадь затрагиваемых засухой земель увеличилась, повторяемость засух возросла почти в два раза. Вместе с тем, изменилось размещение засух, которые стали чаще возникать в северной половине территории, чем в южной.

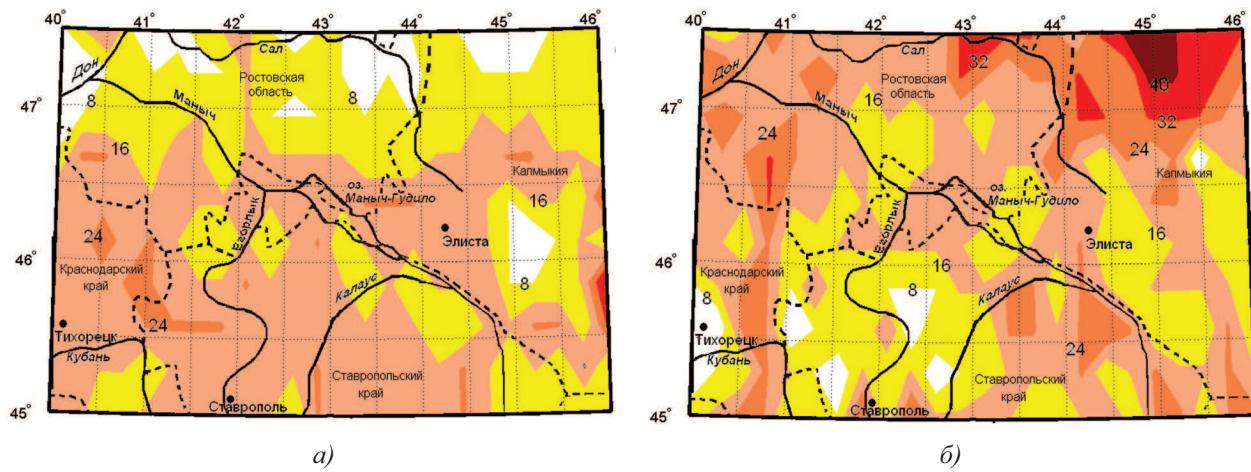


Рис. 4. Повторяемость в % засух на территории Кумо-Манычской впадины. Май-июнь.

а - период 2000-2005 гг.

б - период 2006-2011 гг.

## Заключение

Применение спутникового индекса климатических экстремумов (SCEI) позволяет уменьшить неопределенность в понимании современной тенденции регионального климата и опустынивания засушливых земель. Его значение особенно возрастает для территорий с очень разреженной метеорологической сетью.

Из анализа SCEI на засушливых землях следует важное свойство его распределения (ландшафтная очаговость), которое оставалось недостаточно исследованным при изучении климатических экстремумов по метеорологическим данным. С помощью SCEI можно точнее проводить площадные оценки распространения засух и перевлажнений.

Экстремальная засуха 2010 г. в Европейской России проявилась на территории Кумо-Манычской впадины только к середине лета, в то время как в Поволжье она наблюдалась уже в мае, а Центральном Черноземье – в июне. В мае на территории наблюдались очаги положительной аномалии SCEI.

Более прозрачным стал вопрос о возможной тенденции засушливости территории Кумо-Манычской впадины. Увеличение площадей с отрицательными климатическими экстремумами и сокращение площадей с положительными в период 2006–2011 гг. по сравнению с периодом 2000-2005 гг. повышает вероятность развития фазы иссушения, что необходимо учитывать в планировании устойчивого развития территории.

## Литература

1. Золотокрылин А.Н., Коняев К.В., Титкова Т.Б. Зависимость между аномалиями индекса вегетации и аномалиями месячных сумм осадков в зоне умеренного и недостаточного увлажнения // Исследование Земли из космоса. 2000. № 6. С. 74–78.
2. Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А., Толпин В.А., Медведева М.А., Плотников Д.Е. Спутниковый мониторинг воздействия засухи на растительность (на примере засухи 2010 г. в России) // Современные проблемы зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №1. С. 150–162.

3. Черенкова Е.А. Использование спутниковых данных для анализа изменения влажности почвы и состояния растительного покрова юга Европейской России в конце XX – начале XXI века // Исследование Земли из космоса. 2011. №6. С. 80–87.
4. Bartalis Z., Wagner W., Naeimi V., Hasenauer S., Scipal K., Bonekamp H., Figa J., Anderson C. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) Geophysical Research Letters. 2007. Volume 34, L20401, doi:10.1029/2007GL031088.
5. Ghulam A., Qin Q., Wang L., Zhan Z. and Wang D. Development of Broadband Albedo Based Ecological Safety Monitoring Index // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), September 20-24, 2004, Anchorage, Alaska, Egan Convention Center, USA. 2004. Vol. VI. P. 4115–4118.
6. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions. Proc. of the 18th conf. on agricultural and forest meteorol. Amer. Meteorol. Soc.– West Lafayette (IN). 1987. P. 103–106.
7. Kogan F.N. Remote sensing of weather impacts on vegetation on in non-homogeneous areas International Journal of Remote Sensing. 1990. 11. P. 1405–1419.
8. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection Advances in Space Research. 1995. 15. P. 91–100.
9. Kogan F.N. Global Drought Watch from Space // Bulletin of the American Meteorological Society. 1997. V. 78. P. 621–636.
10. Tucker C.G., Vanpraet C.L., Sharman M.J., Van Ittersum G. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalise Sahel: 1980–1984 // Remote Sens. Enviren. 1985. V. 17. P. 233–249.
11. Tucker C.G., Sellers P.G. Satellite remote sensing of primary production // Int. J. Rem. Sens. 1986. V. 7. P. 1395–1416.

## **Satellite index for assessment of climate extremes in the drylands (with an example from Kuma Manych depression)**

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

*Institute of Geography, RAS  
119017 Russia, Moscow, Staromonetnyi per., 29  
E-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru*

The satellite index for the detection of climatic extrema (Satellite Climatic Extremes Index, SCEI) – drought and overmoistening after a heavy precipitation over drylands was proposed. SCEI calculated as the sum of deviations from a long-term average albedo and surface temperature, NDVI, soil moisture, normalized to standard deviation. Peculiarities of the index for studying the dynamics of desertification with an example from Kuma Manych depression were discussed.

**Keywords:** satellite index of climate extremes, drought, overmoistening, albedo and surface temperature, NDVI, soil moisture, MODIS, drylands, Kuma-Manych depression.