

## Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 гг. на Европейской территории России по метеорологическим и MODIS данным

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

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

Сравниваются характеристики (распространение и интенсивность) засух 2010 и 2012 гг. на Европейской территории России, определенные по метеорологическим и спутниковым индексам. Метеорологические индексы – это нормированная отрицательная аномалия гидротермического коэффициента Селянинова и индекс суховости засухи Палмера. Из многочисленных спутниковых индексов засухи предложен индекс климатических экстремумов увлажнения SCEI. Обсуждаются особенности распространения и интенсивности засух, установленные в результате совместного анализа метеорологических и спутникового индексов.

**Ключевые слова:** засушливые земли, MODIS, NDVI, альbedo и температура поверхности, влажность почвы (SWI), засуха, спутниковый индекс климатических экстремумов (SCEI).

### Введение

Со второй половины 1980-х годов в мировую практику мониторинга засух стали внедряться индексы, построенные на основе спутниковой информации. В настоящее время число спутниковых индексов засухи приближается к 100. Интерес к анализу засух по спутниковым данным усилился в России после обширной и сильной засухи 2010 г. на Европейской территории России (Астафьева, 2011; Савин и др., 2011; Золотокрылин, Титкова, 2012; Золотокрылин и др., 2012). Но определение характеристик обширных и сильных засух (площади, интенсивности, продолжительности) на основе совместного анализа метеорологических и спутниковых данных в России еще не проводилось.

Цель данной работы состоит в выявлении характеристик засух 2010 и 2012 гг. на Европейской территории России, определяемых по метеорологическим индексам и спутниковому индексу климатических экстремумов (SCEI). Дополнительно приведен довод в пользу гипотезы Е.М. Володина (2011) о влиянии влажности почвы на сверхэкстремальную аномалию температуры 2010 г.

### Методика и материалы

Территория исследования охватывает Европейскую территорию России, включая основные зерносеющие районы и примыкающие к ним с юга пастбища. В работе сравниваются распространение и интенсивность засухи по метеорологическим показателям: нормированной аномалии гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК), индексу суховости засухи Палмера (Palmer Drought Severity Index, PDSI), а также спутниковому индексу SCEI.

Показатель ГТК применяется в системе агрометеорологического мониторинга Росгидромета (Оценочный доклад..., 2008). Значения ГТК вычисляются за период с активными температурами воздуха по формуле:

$$\text{ГТК} = \frac{\Sigma P_{>10^\circ\text{C}}}{0,1 \Sigma T_{>10^\circ\text{C}}} \quad (1)$$

где  $P_{>10^\circ\text{C}}$  – суточная сумма осадков за период со средними суточными температурами воздуха выше  $10^\circ\text{C}$ , мм; а  $\Sigma T_{>10^\circ\text{C}}$  – сумма средних суточных температур воздуха за период со средними суточными температурами воздуха выше  $10^\circ\text{C}$ .

В общем виде ГТК выражает отношение суммы осадков (мм) за период с активными температурами к сумме температур. Предполагается, что сумма активных температур, деленная на 10, численно примерно равна испаряемости (мм), и в этом случае ГТК можно рассматривать как коэффициент увлажнения. ГТК изменяется с широтой: в зерновом поясе в зоне недостаточного увлажнения он колеблется в пределах 0,3–0,7, а в зоне достаточного – в пределах 0,8–1,1. ГТК приближается к 1 в условиях оптимального увлажнения. Если ГТК < 0,3 или 0,7 соответственно в зонах недостаточного или достаточного увлажнения, то фиксируется засуха. Нормирование аномалии ГТК на среднеквадратическое отклонение формализует определение засухи (Золотокрылин и др., 2007). Тогда снижение ГТК на среднеквадратическое отклонение рассматривается как слабая засуха, на 1,2–1,6 – умеренная, 1,7–2,0 – сильная, более 2 – экстремальная.

Значения ГТК вычислялись по средним суточным температурам воздуха и суточных сумм осадков по данным 150 метеостанций ЕЧР из климатического архива ВНИИГМИ-МЦД (<http://www.meteo.ru>). Среднее многолетнее ГТК и среднеквадратическое отклонение для расчета нормированной аномалии ГТК на каждой станции определено за полный период исследования.

Из многочисленных метеорологических индексов засухи в работе использован индекс суховости засухи Палмера (Palmer, 1965). Он рассчитывается по доступным метеорологическим данным (месячным значениям температуры и осадков), а также локальным константам влагоемкости почвы. Данные используются для оценки составляющих водного баланса на поверхности почвы по упрощенной схеме влагопереноса в почве. При этом потенциальная эвапотранспирация определяется по методу Торнтийтса (Thorntwaite, 1948). Для учета кумулятивного эффекта продолжительных периодов дефицита влаги предложена рекурсивная процедура построения индекса, т.е. его значение на определенном временном интервале зависит от его значения на предыдущем шаге. Кроме того, используется двухэтапная процедура построения индекса. В итоге рассчитывается стандартизованный индекс Палмера. Он оценивает в месячном масштабе 11 градаций увлажнения территории от экстремальных засух до избыточного увлажнения. Значения индекса от -1 до 1 соответствуют нормальным условиям увлажнения. Засуху характеризуют отрицательные значения индекса: от -1 до -2 – слабая засуха, от -2 до -3 – умеренная, от -3 до -4 – сильная, менее -4 – экстремальная. Глобальный архив ежемесячных значений индекса Палмера с пространственным разрешением  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  с 1890 по 2010 г. доступен по адресу: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/>.

Спутниковый индекс климатических экстремумов увлажнения засушливых земель в общем виде может быть записан как (Золотокрылин, Титкова, 2012):

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

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

При отсутствии данных о влажности почвы индекс может быть использован в сокращенном виде:

$$SCEI_i = - (\Delta A_i / \sigma A + \Delta T_{s,i} / \sigma T_s) + NDVI_i / \sigma NDVI. \quad (3)$$

Значения индекса нормируются на их среднеквадратическое отклонение, чтобы исключить незначимые («шумовые») значения индекса. В этом случае анализировались только значения индекса менее –1 (засуха) и более 1 (переувлажнение). Значения индекса от –1 до –2 характеризуют слабую засуху, от –2 до –3 – умеренную, от –3 до –4 – сильную, менее –4 – экстремальную.

Полная формула SCEI применялась для анализа только засухи 2010 г., а сокращенная – засухи 2012 г., так как для этого года не были еще доступны данные SWI.

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)) LP DAAC NASA (Land Processes Distributed Active Archive Center). Все параметры имеют разрешение 0,05 x 0,05° (в среднем 5600 x 5600 м). Анализировались данные за 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 для периода 2000–2011 гг.

Для альбедо (BRDF-Albedo Model Parameters 16-Day L3 0.05Deg CMG) бралась модель MCD43 C1 версии 005 с дискретностью 16 дней. В данной версии объединялись самые 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. 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, идентичных периодам для альбедо и NDVI.

Данные о почвенной влажности получены из 2-слойной модели TU-Wien пространственного разрешения 12,5 x 12,5 км (Bartalis at el., 2007). 1-й слой представлен значениями влажности почвы на поверхности по измерениям радиометрами со спутников ERS-1 и ERS-2, содержащих информацию о коэффициентах обратного рассеяния. Значения из 1-го слоя

были приведены к единому углу наклона  $40^{\circ}$  и пересчитаны в относительные единицы (%) с учетом зависимости условий увлажнения почвы от географического местоположения. Данные 2-го слоя (индекс почвенной влаги SWI) показывают содержание воды в процентах в почвенной толще глубиной до 1 м. Ранее на ЕТР было рассмотрено изменение влажности почвы по спутниковым данным с мая по сентябрь в период 1992–2006 гг. (Черенкова, 2011).

Следует отметить, что SCEI разработан применительно к засушливым землям, т.е. для территорий с естественным травянистым покровом, используемых как пастбища. Поэтому это обстоятельство надо учитывать при интерпретации SCEI в зерносеющих районах.

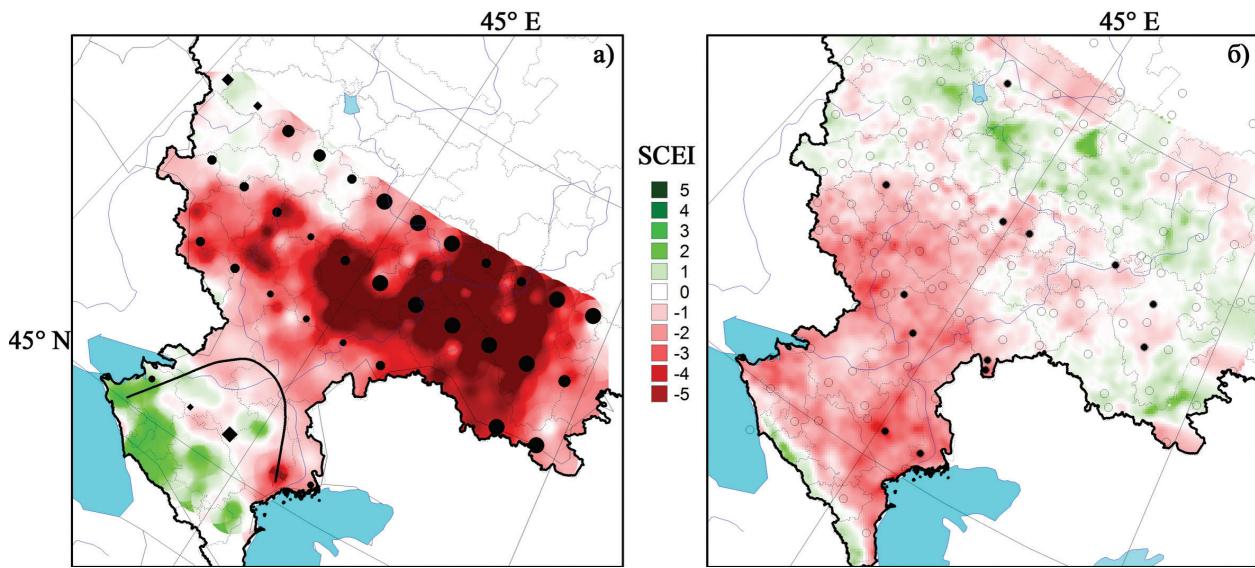
## Результаты и их обсуждение

С помощью индекса SCEI исследовано распространение и интенсивность засух 2010 и 2012 гг. от момента зарождения и до затухания. Засуха 2010 г. возникла в начале мая одновременно на территории Казахстана (южнее Уральска и Акмолинска, линейные размеры очага сильной интенсивности 700–900 км) и на левобережье Средней Волги (в пояссе Казань–Самара, ширина очага сильной интенсивности менее 200 км). ГТК оказался менее чувствительным индексом, чем индекс Палмера. В мае ГТК указал только на слабое повышение засушливости в зерновом поясе ЕТР, но не подтвердил там очаг сильной засухи в отличие от индекса Палмера.

Описание развития засухи 2010 г. по SCEI не противоречит в общих чертах картине, составленной по метеорологическим индексам, но дополняет ее важными деталями. Локализация очагов по разным индексам совпадала в большинстве случаев. По индексу SCEI максимальная интенсивность в очагах засухи превышала экстремальную, в то время как по климатическим индексам она оценивалась иногда как сильная или экстремальная. С помощью SCEI была выявлена многоочаговость засухи, их слияние и расширение экстремального очага в основном в северном и западном направлениях в июле и, наконец, дробление единого экстремального очага в середине августа. Важно отметить, что нераспространение засухи на ее начальном этапе на южные зерносеющие районы (Ростовская область, Краснодарский край и Ставропольский край) заметно уменьшило недобор зерновых. Применение SCEI позволило определить продвижение на север объединенного очага засухи экстремальной интенсивности почти до  $56^{\circ}$  с. ш. и зафиксировать начало его распада во второй половине августа.

На *рис. 1а* градациями красного цвета показаны распространение и интенсивность засухи в июле 2010 г. по данным индекса SCEI с учетом SWI на Европейской территории России. Эти же характеристики засухи отображает интерполированный в узлах градусной сетки индекс Палмера для июля (круги, диаметр которых увеличивается в соответствии с интенсивностью засухи). Рассмотрение индекса Палмера на фоне распределения SCEI скорее указывает на черты сходства, чем различия. Преимущество SCEI по сравнению с метеорологическими индексами очевидно: вследствие сильной разреженности метеосети он детальнее отражает распространение засухи и ее интенсивность на территории, чем

метеорологические индексы. Отчетливо по обоим индексам выделяются на северо-востоке зернового пояса протяженный очаг экстремальной засухи с охватом пяти субъектов РФ, а на юге ЕТР районы, не затрагиваемые засухой.



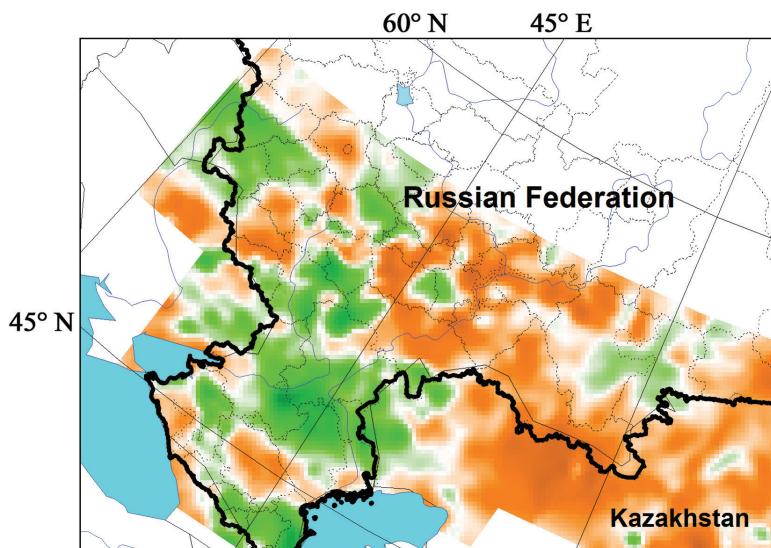
*Рис. 1. Засуха на Европейской территории России по данным SCEI и:*  
*а) в июле 2010 г. по данным индекса суховости засухи Палмера,*  
*б) в мае 2012 г. по данным нормированной аномалии ГТК.*  
*Кругами разного размера отмечена интенсивность засухи*

Сверхэкстремальная аномалия температуры засухи 2010 г. не может быть объяснена полностью только аномальной динамикой атмосферы, вызывающей блокинг и перенос в район аномалии теплого воздуха (Володин, 2011). Согласно гипотезе Е.М. Володина, для ее возникновения необходимо образование заранее (по крайней мере, за месяц) отрицательной аномалии влажности почвы (почвенной засухи), смещенной навстречу ветровому потоку на десятки сотен километров. Подобная аномалия была обнаружена нами на территории Казахстана в мае 2010 г. по данным спутникового индекса климатических экстремумов увлажнения (SCEI) (Золотокрылин и др., 2012) и влажности почвы (SWI) (рис. 2).

Аномалия динамики атмосферы и аномалия влагозапаса почвы – события практически независимые (Володин, 2011). Их случайное совпадение обеспечивает сверхэкстремальную температуру. События 2010 г. могут происходить значительно чаще, чем это следует из нормального распределения. Результаты моделирования не показывают сколько-нибудь существенного влияния влажности почвы на собственно блокинги как явление динамики атмосферы, т.е. на их интенсивность или продолжительность. Влажность почвы влияет только на температуру воздуха у поверхности во время блокинга (Володин, 2011).

По охвату числа экономических районов (пяти) засуха 2010 г. занимает всего 7-е место (1-е и 2-е места у засух 1998 и 1963 гг.) (Страшная и др., 2011). По абсолютному отклонению урожайности зерновых засуха 2010 г. не на первом месте, а по относительному отклонению – она одна из многих засух. Несомненно, засуха 2010 г. была беспрецедентно жесткой, обширной и продолжительной. По напряженности термического режима в сочетании с крайне неблагоприятным режимом увлажнения (атмосферно-почвенной засухой)

и суховеями, пожарами в лесах и на торфяниках на больших площадях она не имела себе равных за последние 120 лет метеорологических наблюдений (Мещерская и др., 2011; Страшная и др., 2011).



*Рис. 2. Аномалия влажности почвы по спутниковым данным SWI в мае 2010 г.  
Зеленым цветом показана положительная аномалия,  
темно-желтым – отрицательная*

Летом 2012 г. засуха вновь повторилась в основных зерносеющих районах Европейской части России, а затем в Азиатской части (Западная Сибирь). На востоке Южного федерального округа жаркая погода уже с первой декады мая способствовала развитию сильной почвенной засухи, которая охватила большую часть Астраханской области, Республики Калмыкия, ряд восточных, южных и отдельных центральных районов Волгоградской области, отдельные северные районы Краснодарского края, восточные и отдельные северные районы Ставропольского края, а также отдельные юго-восточные районы Ростовской и восточные районы Саратовской областей (*рис. 1б*). Как видно из рисунка, в мае очаг сильной засухи сформировался на пастбищах вблизи Каспийского моря, а более мелкие очаги – в районе Среднего Дона. По охвату ЕТР и интенсивности засуха 2012 г. была значительно слабее засухи 2010 г.

В июне засуха распространилась в отдельные южные районы Оренбургской, Ульяновской, Воронежской и местами в Липецкой, Тамбовской и Брянской областей. Засуха вызвала различной степени повреждения зерновых культур и негативно сказалась на урожайности озимых и яровых зерновых культур, особенно на северо-востоке Южного, крайнем юго-востоке Приволжского федеральных округов, в отдельных северных и восточных районах Ставропольского края.

Но в первой декаде июля в большинстве районов Северо-Кавказского и Южного федеральных округов прошли сильные дожди, вызвавшие переувлажнение почвы и сильно замедлившие начавшуюся здесь массовую уборку зерновых культур. Во второй декаде прошли кратковременные ливневые дожди и в ряде южных районов Приволжского

федерального округа и в центральных черноземных областях. Агрометеорологические условия для формирования урожая яровых зерновых культур поздних сроков сева и для пропашных культур улучшились.

Засуха 2012 г. на европейской территории занимает 13-е место в ряду засушливых условий, однако ее последствием стало резкое снижение урожайности и валовых сборов зерна, а в ряде субъектов Российской Федерации, где атмосферная засуха сочеталась с почвенной засухой и частыми суховейными явлениями, – гибель зерновых и других сельскохозяйственных культур (А.И. Страшная, устное сообщение).

### **Заключение**

Совместный анализ метеорологических и спутникового индексов засухи открывает новые возможности в понимании причин возникновения засухи, выявлении особенностей распространения, детализации на территории интенсивности засухи. Засуха 2010 г. на Европейской части территории России была летней и почти не затронула высокоурожайную северо-кавказскую часть зернового пояса. Спутниковые данные подтвердили гипотезу Е.М. Володина об экстремальности засухи 2010 г. на ЕТР, возникшей в результате совпадения блокирования западного переноса и переноса сухого воздуха из удаленного на сотни километров района со сформировавшейся там ранее сильной почвенной засухой.

Засуха 2012 г. на ЕТР, как показывают метеорологические и спутниковые индексы, была менее обширной и интенсивной по сравнению с засухой 2010 г. Она была скорее весенней, чем летней, и затронула в основном юг ЕТР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ОНЗ-13 РАН (проект «Опустынивание засушливых земель юга России в контексте изменений климата»).

### **Литература**

1. Астафьев Н.М. Возможные причины горячего российского лета 2010 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 223–243.
2. Володин Е.М. О природе некоторых сверхэкстремальных аномалий летней температуры: Сб. докладов / Под ред. д. ф.-м. н., проф. Н.П. Шакиной. ГУ «Гидрометцентр России». М.: Триада. 2011. С. 48–57.
3. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Черенкова Е.А. Динамика засух в Европейской России в ситуации глобального потепления // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2007. Т. XXI. С. 160–181.
4. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых земель // Аридные экосистемы. 2012. Т. 18. № 4. С. 5–12.
5. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Виноградова В.В. Спутниковый индекс для оценки климатических экстремумов на засушливых землях (на примере Кумо-Манычской впадины) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 114–121.

6. Мещерская А.В., Мирвис В.М., Голод М.П. Засуха 2010 г. на фоне многолетнего изменения засушливости в основных зерносеющих районах Европейской части России // Тр. ГГО. 2011. Вып. 563. С. 94–122.
7. Савин И.Ю., Барталев С.Ф., 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 дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 150–162.
8. Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В. Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Тр. Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 171–188.
9. 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.
10. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. II. Изменения климата. М.: Росгидромет. 2008. 227 с.
11. 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.
12. Palmer W.C. Meteorological Droughts // US Department of Commerce Weather Bureau Research Paper. 1965. 45. 58 p.
13. Thornthwaite C. W. An approach toward a rational classification of climate // Geogr. Rev. 1948. 38. P. 55–94.

## **Comparative study of droughts 2010 and 2012 in the European Russia from meteorological and MODIS data**

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

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

Distribution and intensity of droughts in 2010 and 2012 in the European Russia were determined and compared using meteorological and satellite indices. Normalized negative anomaly of Selyaninov hydrothermal coefficient and Palmer Drought Severity Index were used as meteorological indices. Satellite Climatic Extreme Index SCEI was selected for the analysis from the several satellite drought indices. Features of drought distribution and intensity identified in the combined analysis of meteorological and satellite indices are discussed.

**Keywords:** drylands, MODIS, NDVI, albedo and surface temperature, soil moisture, drought, satellite index of climate extremes (SCEI).