

КАРТОГРАФИЯ И ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 528.87

А.Н. Шихов**КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗАСУХ НА ТЕРРИТОРИИ
УРАЛЬСКОГО ПРИКАМЬЯ ПО МНОГОЛЕТНИМ РЯДАМ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

В работе рассматривается методика космического мониторинга сельскохозяйственной засухи, на основе многолетних рядов индекса условий вегетации VCI. Индекс условий вегетации рассчитывается по декадным композитам NDVI, что позволяет исключить влияние облачности и другие помехи. На материалах 2003-2013 гг. установлено, что данный индекс может быть использован для оценки интенсивности засухи и хорошо коррелирует с гидротермическим коэффициентом Селянинова.

Ключевые слова: засуха; космический мониторинг; NDVI; индекс условий вегетации; гидротермический коэффициент.

Засуха – это комплексное природное явление, связанное с дефицитом влаги. Засухи наблюдаются в разных климатических зонах и наносят огромный ущерб. Существуют разные подходы к классификации засух. В зависимости от среды, в которой наблюдаются признаки дефицита влаги, различают атмосферные и почвенные засухи, а также говорят об общей атмосферно-почвенной засухе [3]. Критерии атмосферной и почвенной засухи как опасного агрометеорологического явления, принятые для территории деятельности Уральского УГМС, приведены в [1].

Основными признаками метеорологической (атмосферной) засухи являются дефицит осадков, уменьшение поверхностного стока, инфильтрации и пополнения грунтовых вод, а также высокий температурный фон, низкая относительная влажность воздуха, повышенный приток солнечной радиации. Совокупность этих факторов приводит к увеличенному испарению и транспирации влаги растениями. Основной причиной развития атмосферных засух являются долгоживущие блокирующие антициклоны [1; 3].

Сельскохозяйственная засуха характеризуется уменьшением влажности почвы, что приводит к стрессу растений, снижению биопродуктивности и урожая. Начало сельскохозяйственной засухи по времени может значительно отличаться от начала метеорологической засухи в зависимости от имеющихся влагозапасов в почве перед началом засушливого периода.

По времени наступления засухи на территории России подразделяются на весенние, летние и осенние. Иногда засухи продолжаются несколько месяцев подряд, охватывая два-три сезона. По интенсивности и охвату территории засухи делятся на очень сильные, сильные, средние и слабые [3].

Для территории Уральского Прикамья, большая часть которой расположена в зоне избыточного увлажнения, сильные почвенные засухи менее характерны, чем для более южных регионов Поволжья и Урала. В последние годы они наблюдались в июле-августе 2010 г., и в июне-июле 2013 г. В обоих случаях, вследствие значительных убытков, нанесенных засухой, был введен режим чрезвычайной ситуации в агропромышленном комплексе края [4].

Для смягчения последствий засухи необходимо ее своевременное выявление, мониторинг развития и оперативная оценка ущерба. Для решения перечисленных задач мониторинга засухи на обширных территориях в оперативном режиме требуется использование не только традиционных наземных, но и космических наблюдений [8; 9].

В традиционных методах выявления засухи и оценки ее параметров используются данные наземных метеорологических наблюдений (количество осадков, температура поверхности почвы и

воздуха, влажность почвы и воздуха). Для разных природных условий предложены разнообразные индексы, позволяющие оценивать интенсивность засухи. На территории России наиболее часто применяются гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК) и индекс засушливости Педя. Гидротермический коэффициент вычисляется по формуле

$$\text{ГТК} = \frac{10 \sum P}{\sum T_{>10}}, \quad (1)$$

где P – сумма осадков (мм) и T – сумма среднесуточных температур ($^{\circ}\text{C}$) за период с $T \geq 10^{\circ}\text{C}$.

Разной степени увлажнения соответствуют следующие градации ГТК: $\text{ГТК} < 0,4$ – очень сильная засуха; $0,4 \leq \text{ГТК} < 0,5$ – сильная засуха; $0,5 \leq \text{ГТК} < 0,7$ – средняя засушливость; $0,7 \leq \text{ГТК} \leq 1,0$ – недостаточно влажно; $1,0 < \text{ГТК} \leq 2,0$ – достаточно влажно; $\text{ГТК} > 2,0$ – переувлажнено [5].

Показатель засушливости, предложенный Д.А. Педем, вычисляется по формуле

$$s = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta P}{\sigma_P} \quad (2)$$

где ΔT , ΔP – отклонения температуры воздуха и суммы осадков от нормы, σ_T , σ_P – средние квадратические отклонения средних месячных значений температуры воздуха и осадков.

Теплолагообеспеченность по индексу Д.А. Педя оценивается по следующей шкале: $S < -3,0$ – сильное избыточное увлажнение; $-3,0 \leq S < -2,0$ – среднее избыточное увлажнение; $-2,0 \leq S < -1,0$ – слабое избыточное увлажнение; $-1,0 \leq S < 1,0$ – близкое к норме; $1,0 \leq S < 2,0$ – слабая засуха; $-2,0 \leq S < 3,0$ – средняя засуха; $S \geq 3,0$ – сильная засуха [5].

Основной проблемой традиционных методов выявления засухи является редкая сеть наблюдений и невозможность детального учета пространственного распределения конвективных осадков в весенне-летний период. Вследствие этого космический мониторинг может обеспечить большую заблаговременность выявления признаков засухи, чем традиционные методы, а также выявление очага засухи и направления ее распространения [7].

Методика космического мониторинга засух

Вопросами космического мониторинга сельскохозяйственной засухи занимались исследователи в различных странах мира. Ими было предложено множество методов, основанных на индексах, которые являются дробно-линейными комбинациями спектральных каналов в видимом, ближнем инфракрасном и тепловом диапазонах спектра. Они позволяют учесть различия в отражательной способности (обычно в красном и ближнем инфракрасном диапазонах) растительности, находящейся в нормальном и стрессовом состоянии. По данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) отслеживается состояние сельскохозяйственных культур по проективному покрытию ими почвы и температурный режим района. Признаки наступления засухи по данным ДЗЗ выявляются на основе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI и яркостной температуры подстилающей поверхности, а также различных комбинаций этих параметров [8; 9]. Для проверки пригодности используемых индексов на исследуемой территории желательна сопоставление с фактическими данными о гидротермическом режиме исследуемого периода и урожайности сельхозкультур.

В качестве исходных данных для мониторинга засух чаще всего используются космические снимки низкого разрешения, с высокой повторяемостью съемки и длительным рядом наблюдений – Terra/Aqua MODIS и NOAA AVHRR. Наиболее известными индексами, используемыми для мониторинга засухи на основе данных с этих спутников, являются индекс условий роста растительности (Vegetation Condition Index, VCI) и «индекс засухи» (Index of Drought) [6; 8; 9].

Индекс VCI вычисляется следующим образом:

$$\text{VCI}_j = (\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \times 100\%, \quad (3)$$

где VCI_j – значение индекса условий роста растительности для даты j ;

NDVI_j – индекс NDVI значений для даты j ;

NDVI_{\max} – максимальное значение NDVI внутри всего набора данных;

NDVI_{\min} – минимальное значение NDVI внутри всего набора данных.

Использование индекса условий вегетации VCI позволяет учесть естественное изменение спектральных характеристик растительности в течение вегетационного периода, уменьшает влияние природных факторов (погодных условий, экосистемных изменений, почвенных, топографических условий), позволяет сравнивать между собой отсчеты NDVI в разных природных зонах, разных ландшафтах и при разных погодных условиях.

Значения VCI изменяются от 0 до 100%, отражая изменения условий вегетации. Условия считаются влажными и благоприятными для растительности на данной территории при значении индекса более 70% (выше многолетней нормы). Изменения VCI в диапазоне 30-70% отражают близкие к норме условия увлажнения. Стрессовое состояние растительности наступает при значении индекса менее 30% (ниже нормы) [6].

На практике расчет индекса VCI целесообразно осуществлять на основе декадных или пентадных композитных значений NDVI. Композит вычисляется путем выбора максимального значения за 5 или 10 дней. Это позволяет сгладить суточные вариации NDVI, в большинстве случаев устранить влияние облачности и задымления от пожаров.

В отличие от индексов VCI и NDVI, «индекс засухи» учитывает не только изменение состояния растительности, но и температуру подстилающей поверхности в дневные и ночные часы. Он прямо пропорционален сумме дневной и ночной температуры и обратно пропорционален NDVI:

$$ID = (T_n + T_d)/NDVI. \quad (4)$$

Для территории Поволжья значения $ID < 1400$ соответствуют нормальному состоянию растительности, от 1400 до 1600 – средней и сильной засухе, > 1600 – катастрофической засухе [8; 9].

Существенным недостатком данного индекса является сильная зависимость от облачности (поскольку используются данные не только дневной, но и ночной съемки, снижается вероятность получения двух безоблачных снимков) и невозможность использования композитных изображений для устранения влияния облачности. В связи с этим для территории Уральского Прикамья более эффективным является мониторинг засух на основе декадных композитов NDVI и VCI.

В качестве исходных данных для мониторинга и оценки интенсивности засух на территории Уральского Прикамья используются многолетние ряды данных ДЗЗ со спутника Terra (MODIS) и вычисленные на их основе вегетационные индексы за 2003-2013 гг., с пространственным разрешением 1000 м, а также маска земель сельскохозяйственного назначения.

На основе выборки ежедневных значений NDVI, рассчитанных по малооблачным снимкам, были получены декадные композиты – максимальные значения NDVI за декаду (в период июнь-август). При этом декады, в течение которых не было получено ни одного малооблачного снимка, приходилось пропускать. Число пропусков определяется числом малооблачных дней в течение вегетационного периода, максимальным оно было в 2007, 2009 г. (по 3 декады), когда наблюдалась значительная облачность в течение всего летнего сезона.

По многолетним рядам декадных композитов вычислены норма (средние значения), максимумы и минимумы NDVI для каждой декады, а на их основе получены многолетние ряды индекса условий вегетации VCI, рассчитанного по формуле (3) и проведена оценка состояния растительности по трем градациям:

- $0 < VCI < 30\%$ – ниже многолетней нормы, оценка «плохое состояние»;
- $30\% < VCI < 70\%$ – близко к многолетней норме, оценка «норма»;
- $70\% < VCI < 100\%$ – выше многолетней нормы, «хорошее состояние».

В результате были построены декадные карты условий вегетации и выполнен анализ развития засух. На рис. 1 и 2 представлены карты состояния растительности при засухе в южной части Уральского Прикамья в июне-августе 2010 и 2013 г. (расчет выполнен только для безлесной территории). На рис. 3 и 4 показано распределение площадей участков с различными условиями вегетации по всей площади сельхозугодий Пермского края за 2010 и 2013 г. Анализ условий вегетации, таким образом, дает возможность сопоставить интенсивность засух 2010 и 2013 г. на исследуемой территории. Их сравнительная характеристика приведена в табл. 1.

Наиболее суровой за исследуемый период была засуха в июле-августе 2010 г. В целом по европейской территории России по напряженности гидротермического режима (экстремально высокие температуры воздуха на фоне практически полного отсутствия эффективных осадков в течение 60-80 дней) она не имеет аналогов за все время метеорологических наблюдений [7]. Кроме того, в этот период на большей части Уральского Прикамья наблюдалась чрезвычайная пожароопасность (индекс Нестерова достигал 10000–19000). Площадь лесных массивов, пройденных пожарами летом 2010 г. на территории Пермского края, составила 32 тыс. га.

Засуха в июне-июле 2013 г. была значительно менее интенсивной, чем в 2010 г. Значительный ущерб от засухи 2013 г. был обусловлен тем, что максимум ее интенсивности пришелся на начало июля, т.е. на критический период для формирования урожая зерновых культур. В третьей декаде июля в большинстве районов прошли эффективные осадки, засуха прекратилась, условия вегетации

приблизились к норме (рис. 2, 4, 5).

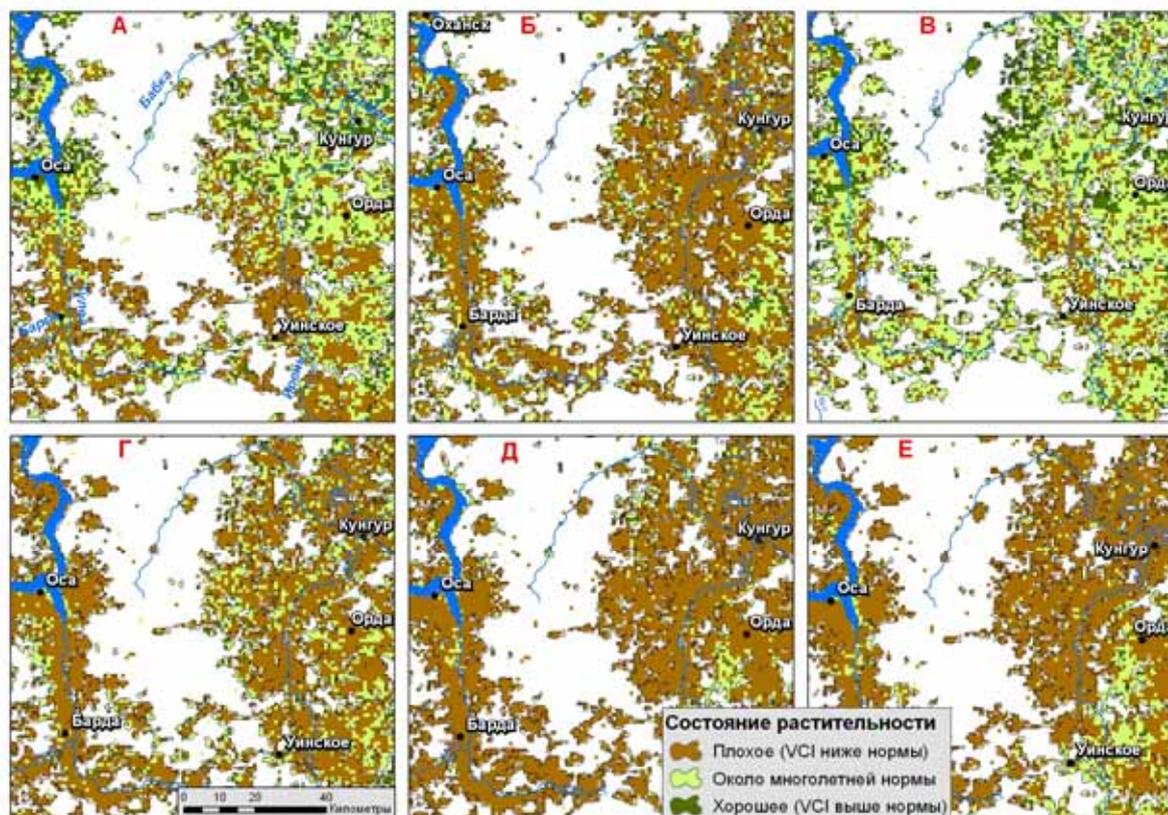


Рис. 1. Развитие засухи летом 2010 г.: А – третья декада июня; Б – первая декада июля; В – вторая декада июля; Г – третья декада июля; Д – первая декада августа; Е – вторая декада августа

Таблица 1

Сравнительная характеристика засух 2010 и 2013 г. в Пермском крае

| Показатели | Засуха летом 2010 г. | Засуха летом 2013 г. |
|---|---|--|
| Продолжительность засушливого периода | 20.06. – 20.08.2010 г. (местами по югу края – с конца мая 2010 г.) | 10.06. – 20.07.2013 г. (местами – по 10 июля 2013 г.) |
| Максимальные температуры воздуха | +35...+38° | +32,5...+35° |
| Отклонение температуры воздуха от нормы (в среднем за период засухи) | +3...+4,5° | +2...+3° |
| Число дней с максимальной температурой выше +30° | По северу 10-15, по югу 20-34 | 5–9 |
| Гидротермический коэффициент | 0,1...0,25 | 0,2...0,5 |
| Продолжительность сельскохозяйственной засухи (по индексу условий вегетации) | С 20.07. по 20.08.2010 | С 01.07. по 20.07.2013 |
| Максимальная доля площади сельхозугодий с условиями вегетации ниже средних | 86% | 72% |
| Средняя величина снижения NDVI относительно декадных норм | 0,079 | 0,077 |
| Пострадавшая территория | Вся территория края | Преимущественно южные районы края |
| Материальный ущерб от гибели посевов (по данным Министерства сельского хозяйства) | 135,7 млн. руб. (на 5 августа 2010 г.) | Повреждены посевы на 267 тыс. га. Ущерб более 50 млн. руб. |

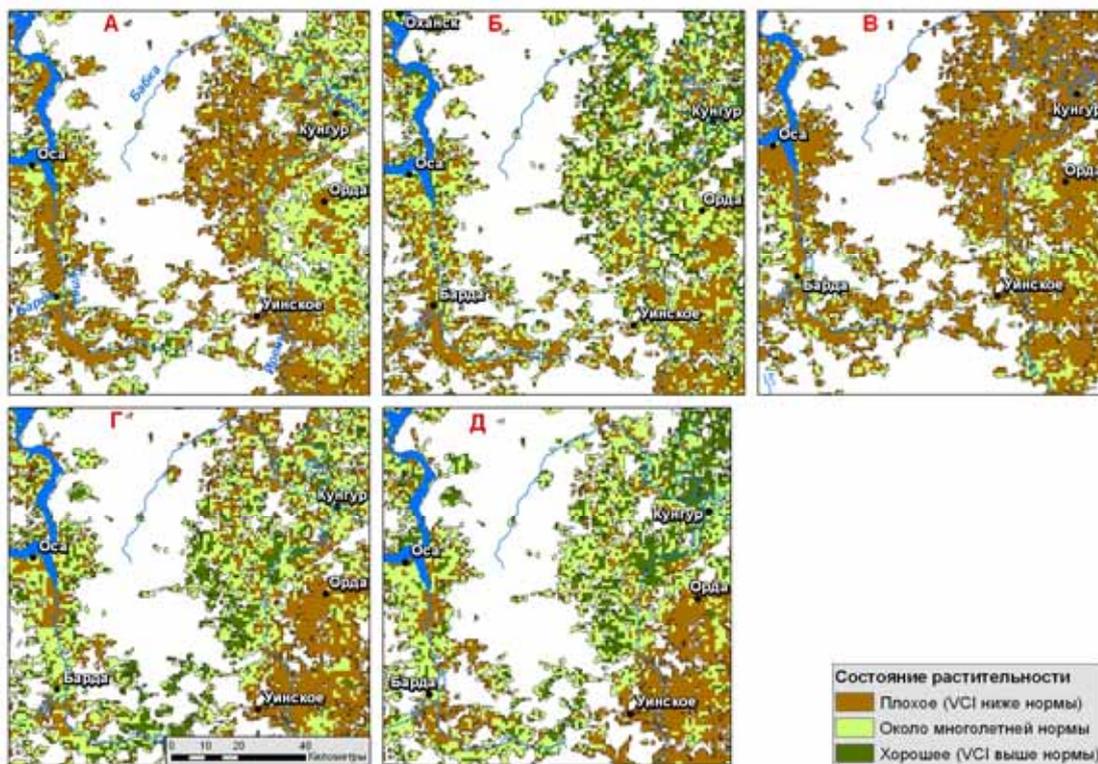


Рис. 2. Развитие засухи летом 2013 г.: А – третья декада июня; Б – первая декада июля; В – вторая декада июля; Г – первая декада августа; Д – вторая декада августа

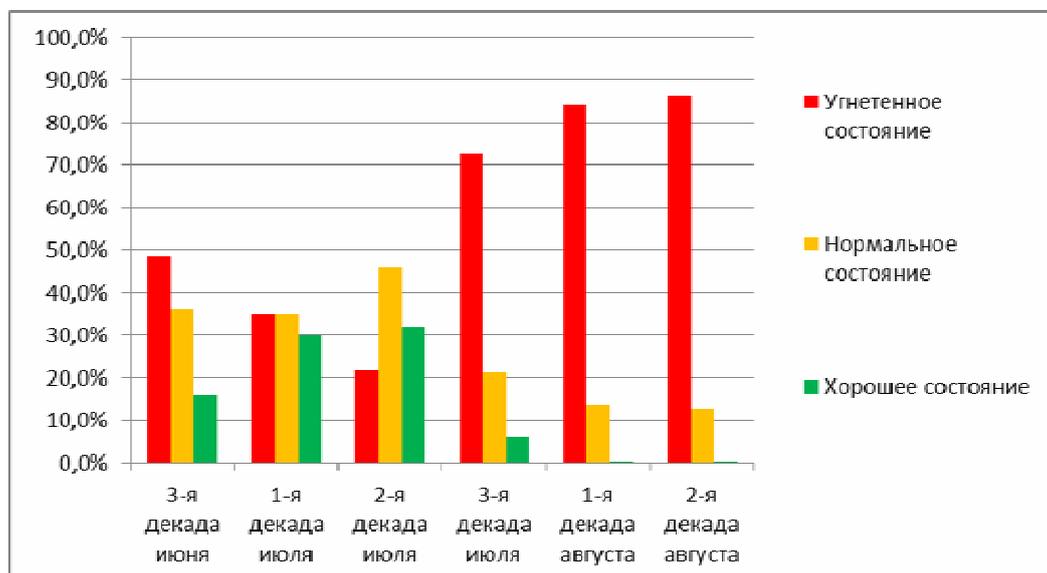


Рис. 3. Распределение площадей сельхозугодий с различными условиями вегетации в июне-августе 2010 г.

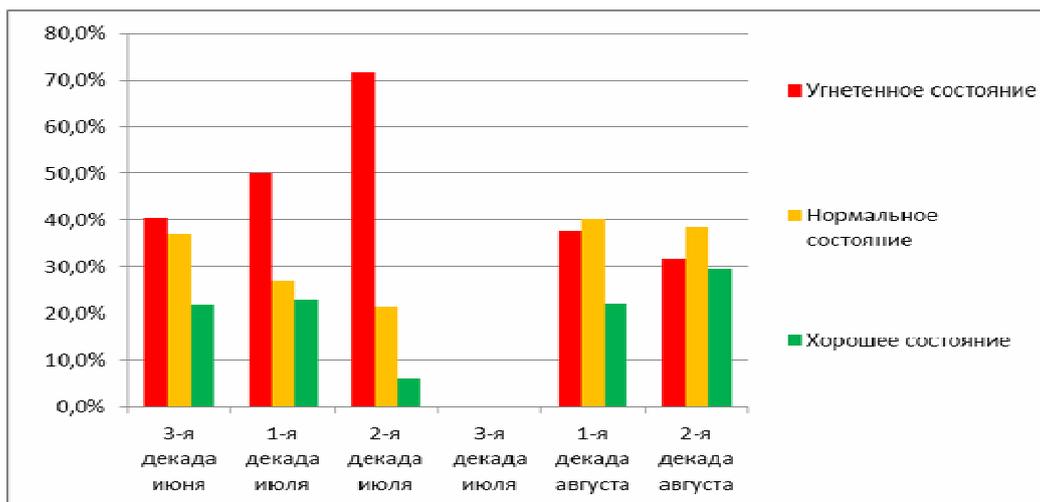


Рис. 4. Распределение площадей сельхозугодий с различными условиями вегетации в июне-августе 2013 г.

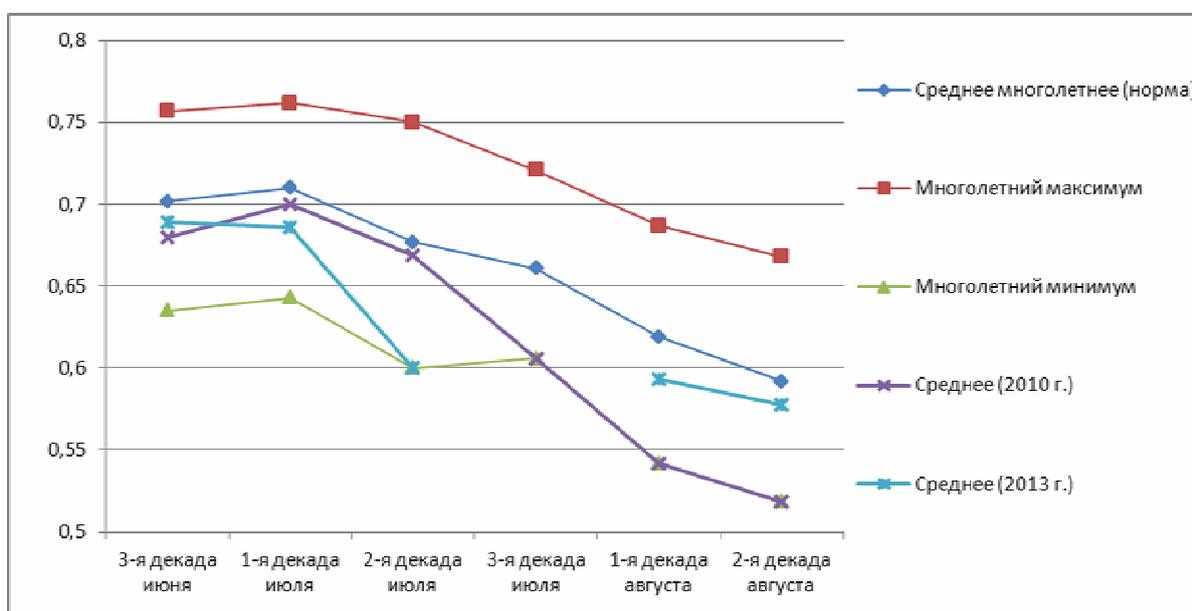


Рис. 5. Динамика NDVI в пределах площади сельхозугодий Пермского края в июне-августе 2010 и 2013 г. (в сравнении с нормой)

Сопоставление индекса условий вегетации VCI с данными о гидротермическом режиме исследуемого периода (который оценивался по гидротермическому коэффициенту Селянинова, ГТК) указывает на зависимость условий вегетации от условий увлажнения. ГТК рассчитывался за летний период методом скользящего осреднения по шести декадам (в июне – по трем декадам), чтобы оценить накопленную засухливость. Коэффициент корреляции между рассчитанным таким образом ГТК и индексом условий вегетации VCI составляет 0,65. Линейная зависимость индекса условий вегетации от ГТК, полученная на материалах наблюдений 2010–2013 гг., показана на рис. 6. Ряды наблюдений для расчета корреляции включали по 23 значения индекса условий вегетации и гидротермического коэффициента. Значение t-критерия Стьюдента для выявленной зависимости составляет 3,85 при уровне значимости, равном 0,05. Критическое значение критерия составляет 2,08. Таким образом, зависимость индекса условий вегетации от ГТК является статистически значимой.

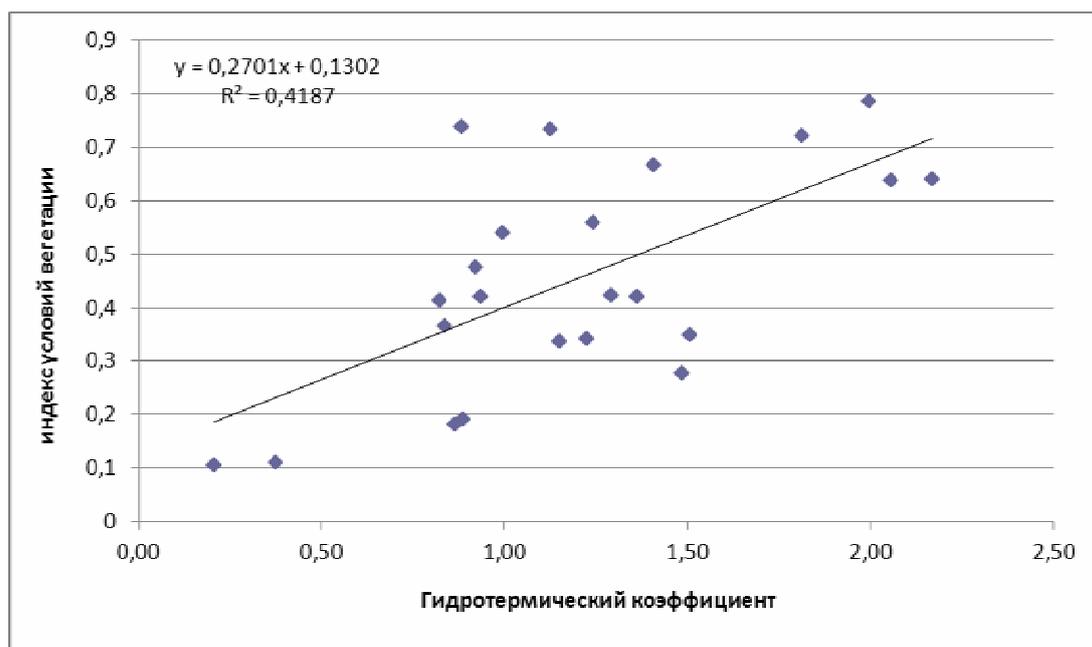


Рис. 6. Зависимость индекса условий вегетации от гидротермического коэффициента (за 2010-2013 гг.)

Методика мониторинга засух на основе индекса условий вегетации VCI позволяет, таким образом, оценить пространственно-временные закономерности развития засухи и ее интенсивность. При накоплении более длительного ряда спутниковых наблюдений (не менее 15 лет) на основе временных рядов NDVI и VCI может быть также выполнена оценка повторяемости засух на исследуемой территории. Аналогичное исследование по спутниковым данным Terra/Aqua MODIS проведено для территории Республики Казахстан [6].

Недостатком используемой методики мониторинга является невозможность проведения прямой оценки ущерба от засухи для каждого отдельного поля, поскольку пространственное разрешение используемых спутниковых данных Terra/Aqua MODIS недостаточно для этого. На наш взгляд, для выполнения прямых оценок ущерба от засухи наиболее перспективным инструментом из имеющихся данных ДЗЗ являются снимки LANDSAT-8 и UK-DMC2, обладающие более высоким пространственным разрешением, но существенно меньшей повторяемостью съемки.

Библиографический список

1. Калинин Н.А., Аликина И.Я., Ермакова Л.Н. Особенности формирования высокой температуры воздуха в сентябре-октябре 2003 г. на Среднем и Южном Урале // Метеорология и гидрология. 2005. №5. С. 82–89.
2. Критерии опасных гидрометеорологических явлений для территории деятельности Уральского УГМС. URL: <http://www.svgimet.ru/index.php?page=prognos&pid=100001> (дата обращения: 07.09.2013).
3. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем: монография / под ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. 506 с.
4. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Пермского края. URL: <http://agro.permkrai.ru/> (дата обращения: 07.09.2013).
5. Переведенцев Ю.П., Шарипова Р.Б., Важнова Н.А. Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур / Вестник УдГУ. Сер. Биология, Науки о Земле. 2012. №2. С. 120–126.
6. Стивак А.Ф. и др. Космический мониторинг засух в Казахстане: анализ многолетних рядов данных дистанционного зондирования // Земля из Космоса – наиболее эффективные решения. 2012. № 1 (13). С. 15–23.
7. Фролов А.В., Страшная А.И. О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур / Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г.: сб. докладов / под ред. Н.П. Шакиной. М.: Триада-ЛГД, 2011. 72 с.
8. Щербенко Е.В. Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2007. Т.4, № 2. С. 408–419.

9. Щербенко Е.В. Мониторинг засухи по данным космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2007. Т.4, № 2. С. 395–407.

A.N. Shikhov

**THE SPACE MONITORING OF DROUGHT ON THE TERRITORY OF URAL KAMA REGION,
BASED OF LONG-TERM REMOTE SENSING DATA SERIES**

The article analyze the methodology of space monitoring of the agricultural drought, based of long term series of vegetation conditions index (VCI). The Index is calculated by ten-day NDVI composites, which eliminates the influence of cloudiness and other interference. Based of materials of 2003-2013 years, the author found, that this index allows to estimate the intensity of drought, and well correlates with hydrothermal coefficient.

Key words: drought; space monitoring; NDVI; vegetation conditions index; hydrothermal coefficient.

Andrey N. Shikhov, postgraduate of Department of cartography and geoinformatics, Perm State University, 15 Bukireva st., Perm, Russia 614990; and3131@inbox.ru.