

Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи

Е.В. Щербенко

*Институт космических исследований РАН
117997 г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32
E-mail: elenashcherbenko@yandex.ru*

В данной статье приводится обзор существующих методов дистанционного зондирования для обнаружения и мониторинга территорий, подвергшихся засухе. Наряду с традиционными методами, использующими только метеорологические параметры, рассмотрены комбинированные индексы, основанные на метеоданных и данных дистанционного зондирования, а также индексы, не использующие наземные данные. Особое внимание уделено индексам, основанным на комбинировании видимого, ближнего ИК и тепловых каналов спектра при съемках как в дневное, так и в ночное время суток. Показаны преимущества использования отдельных индексов в разных регионах мира.

Введение

Вопросами мониторинга сельскохозяйственной засухи по спутниковым данным занимались исследователи в различных странах мира. В результате исследований предложено большое количество методов, основанных на индексах, которые являются дробно-линейными комбинациями спектральных каналов в видимом, ближнем инфракрасном и инфракрасном диапазонах спектра. В комплексе со спутниковыми данными многие авторы используют традиционные методы выявления и мониторинга сельскохозяйственных засух.

Целью работы является описание существующих методов выявления и мониторинга сельскохозяйственных засух по данным космических съемок.

1. Традиционные методы выявления засухи

При традиционных определениях засухи и ее параметров используют такие метеорологические данные, как количество осадков, температура поверхности почвы и воздуха, влажность почвы и воздуха и др. Для разных природных условий предложены разнообразные индексы, позволяющие проводить мониторинг засухи. Одного индекса, универсального, пригодного для всех обстоятельств не существует. Перечень используемых в США индексов для определения засухи представлен Michael J. Hayes (National Drought Mitigation Center) [www.drought.unl.edu/whatis/concept.htm]. Наиболее популярен в США Индекс Пальмера, который используют для определения наступления засухи и выявления степени ее суровости. Этот индекс определяет метеорологическую засуху. Он основан на концепции «запас-расход» влаги уравнения водного баланса, учитывающего точный дефицит осадков и специфику местоположения. По этим показателям определяется почвенная влажность. Индекс калиброван для однородных участков, поэтому он хорошо работает на больших участках с одинаковой топографией. В гористой местности Западных штатов с характерным микроклиматом чаще пользуются индексом «Запаса поверхностной влаги» (Surface Water Supply Index), который учитывает уникальные факторы, характерные для данной местности, такие, например, как запасы снежного покрова. Национальный Центр засухи в Мичигане для мониторинга условий увлажнения использует «Стандартный индекс осадков» (Standardized Precipitation Index SPI). Этот индекс основан на вычислении вероятности выпадения осадков для любого временного масштаба. Отличительной чертой этого индекса является то, что он выявляет наступление засухи раньше, чем индекс Пальмера. Для диагностики состояния

посевов и для определения графика полива полей Идсо и Джексон [1] предложили индекс, основанный на измерении дневной температуры растительного покрова. Этот индекс назвали «Индексом критического содержания воды в посевах» (CWSI). Он нормализует сезонные и дневные разницы температурных измерений растительного покрова:

$$CWSI=1-mad=1-Ed/Epd,$$

где E_d является ежедневным действительным суммарным испарением; и E_{pd} является ежедневным теоретическим испарением; и mad это реальная влажность, которая представляет собой отношение ежедневного действительного к ежедневному теоретическому испарению.

2. Дистанционные методы выявления засухи

2.1. Параметры, используемые при выявлении засухи методами дистанционного зондирования

По космическим данным в видимом, ближнем инфракрасном и инфракрасном диапазонах спектра нельзя определить количество выпавших осадков, но можно определить состояние сельскохозяйственных культур по проективному покрытию ими почвы и температурный режим района. Поэтому, основными признаками засухи при использовании методов ДЗЗ являются именно эти параметры и их изменение в результате развития засухи. В качестве исходных данных, получаемых из космической информации, используют обычно нормализованный вегетационный индекс NDVI или яркостные или физические температуры поверхности и комбинации этих параметров. В качестве подтверждающего данные ДЗЗ независимого индикатора засухи может выступать такая характеристика растительности как урожай сельскохозяйственных культур и пастбищ [2].

2.2. Выявление состояния растительности по видимым и ближним ИК каналам съемки

При выявлении состояния растительности обычно используют вегетационные индексы, которые являются линейными или дробно-линейными комбинациями двух спектральных каналов: 0,6-0,7 мкм (красный диапазон спектра) и 0,8-0,9 мкм (ближний ИК диапазон спектра). Выбор этих спектральных каналов обусловлен тем, что в красном диапазоне спектра растительность имеет наименьшее отражение, а в ближнем ИК-диапазоне спектра – самое высокое отражение по сравнению с другими природными объектами. То есть, для растительности в хорошем состоянии характерно падение спектральной кривой в красном диапазоне и резкий подъем в ближнем ИК-диапазоне. Вегетационные индексы описаны во многих работах [3-6] и были успешно использованы разными авторами. Наиболее устойчив к разным факторам: типу съемочной аппаратуры, высоте Солнца и углу сканирования спутника, плотности атмосферы и др. является нормализованный вегетационный индекс NDVI, который представляет собой разность значений ближнего ИК и красного каналов, деленную на сумму этих значений.

$$NDVI_{ij}=(IK_{ij}-K_{ij})/(IK_{ij}+K_{ij}),$$

где $NDVI_{ij}$ – значение нормализованного вегетационного индекса для каждого пиксела изображения;

i, j – номер строки и столбца пиксела,

IK_{ij} – значение пиксела в ближнем ИК канале спектра;

K_{ij} – значение пиксела в красном канале спектра.

NDVI используют как для выявления состояния растительности в отдельной точке изображения, так и для общего представления о состоянии растительности всего региона. В последнем слу-

чае используют его среднее значение, максимальное, минимальное, а также медиану и моду по всему изображению или выделенной части изображения.

Многие авторы определяют ухудшение или улучшение состояния растительности, сравнивая значения NDVI двух и более лет съемки. Подходы для сравнения этих величин могут быть как визуальными, так и статистическими. F.Kogan [3] предложил новый индекс, который учитывает не отдельные значения NDVI, а изменение этих значений в течение вегетационного периода и назвал этот индекс индексом условий роста растительности (Vegetation Condition Index VCI). VCI выражен следующим образом:

$$VCI_j = (NDVI_j - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) * 100\%,$$

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

$NDVI_j$ – изображение NDVI значений для даты j ;

$NDVI_{max}$ – изображение максимальных NDVI значений внутри всего набора данных;

$NDVI_{min}$ – изображение минимальных NDVI значений внутри всего набора данных. То есть

VCI_j – это процентное отношение значений NDVI за время j по отношению к максимальной амплитуде изменений значений NDVI за рассматриваемый период времени. VCI используют в качестве показателя условий роста растительности в отдельно взятом регионе.

Kogan [3] успешно применил этот индекс для мониторинга засухи и оценки условий роста растительности как в США, так и в других странах. Он выяснил, что если использовать этот индекс в течение многих лет, то можно оценить потенциальную способность данного региона для получения урожаев сельскохозяйственных культур. Индекс VCI уменьшает влияние природных факторов (погодных условий, географических, экосистемных изменений, почвенных, растительных, топографических условий), позволяет сравнивать между собой отсчеты NDVI в разных природных зонах, разных ландшафтах и при разных погодных условиях. На примере южного Судана [3] было выявлено, что индекс VCI имеет более тесные связи с количеством выпавших осадков, чем NDVI.

Индекс VCI был успешно применен [7] при изучении климатологии засухи на юго-востоке Русской равнины. Данный индекс применялся в качестве показателя засухи в течение 20 лет. Значения VCI изменялись от 0 до 100%, отражая изменения погодных условий вегетации от сухих до влажных. Условия считаются влажными и благоприятными для растительности на данной территории при значении индекса более 70%. Изменения VCI в диапазоне 30-70% отражают близкие к норме условия увлажнения. Стрессовое состояние растительности наступает при значении индекса менее 30%. Вычислялись сезонные (май – сентябрь) и месячные показатели засухи. Месячный показатель засухи определялся как частное от деления суммы месяцев с $VCI < 30\%$ за разные годы на число исследуемых лет, сезонный показатель учитывал только период возможной засухи май – сентябрь. Таким образом была определена средняя многолетняя продолжительность стрессового периода для разных районов и территорий юго-востока Русской равнины за ряд лет. Было выявлено, что районы характеризуются особым внутрисезонным изменением показателя засухи, а средняя продолжительность засухи на значительной части территории сократилась в 1992 – 2001 годах по сравнению с 1982 – 1991 годами.

Lu и Kogan [8] определили, что индекс VCI имеет высокую корреляцию с водным дефицитом и осадками. Для саванн и лесов с дождливыми и сухими сезонами было предложено считать, что засуха наступила, если:

- сумма осадков, выпавших за месяц в данном регионе меньше, чем 50 мм;
- NDVI ниже 0.18;
- количество выпавших в месяце осадков на 50% ниже нормы (среднемесячных значений), при норме выше 50мм;
- VCI ниже, чем 36%.

Водный стресс – это только одна из причин засухи. Для учета всех природных изменений (температуры воздуха, солнечной радиации, фенофазы культур) эти авторы предлагают использовать VCI для месяца или интересующего сезона. Этот индекс они назвали «Сезонный индекс ус-

ловий роста растений» («The monthly vegetation condition index MVCI»). Для января он будет выглядеть так:

$$MVCI_{j, Jan} = (NDVI_{j, Jan} - NDVI_{min, Jan}) / (NDVI_{max, Jan} - NDVI_{min, Jan}) * 100\%,$$

где $MVCI_{j, Jan}$ – значение сезонного индекса условий роста растительности для даты j января месяца;

$NDVI_{j, Jan}$ – изображение из NDVI значений для даты j января месяца;

$NDVI_{max, Jan}$ – изображение максимальных NDVI значений всего января;

$NDVI_{min, Jan}$ – изображение минимальных NDVI значений всего января.

MVCI может быть вычислен для любого месяца, сезона или отрезка времени. Это позволяет сравнивать условия роста растений в одни и те же месяцы или одни и те же фенофазы, но в разные годы. Этот метод использовал Reed [9] для выявления аномалий роста растительности при долговременных наблюдениях. Временные композиции индекса NDVI использовали в США, Австралии, Африке при мониторинге состояния, роста и развития культурной и пастбищной растительности, для наблюдения за передвижением стад диких животных и слежения за домашними животными, пасущимися в огромных загонах, для выявления угрозы голода и др.

Для нахождения различий в росте растений в течение двух последовательных месяцев, то есть для сравнения двух месяцев по максимальным значениям NDVI был предложен индекс «Максимального значения композитных различий» (the maximum value composite differential MVCD) [10,11]. MVCD вычисляется в два этапа: 1) создается изображение различий вычитанием изображения «времени 2» от «времени 1» и 2) проводится логарифмическое растяжение полученных данных для увеличения незначительных различий в NDVI сигнале между двумя месяцами.

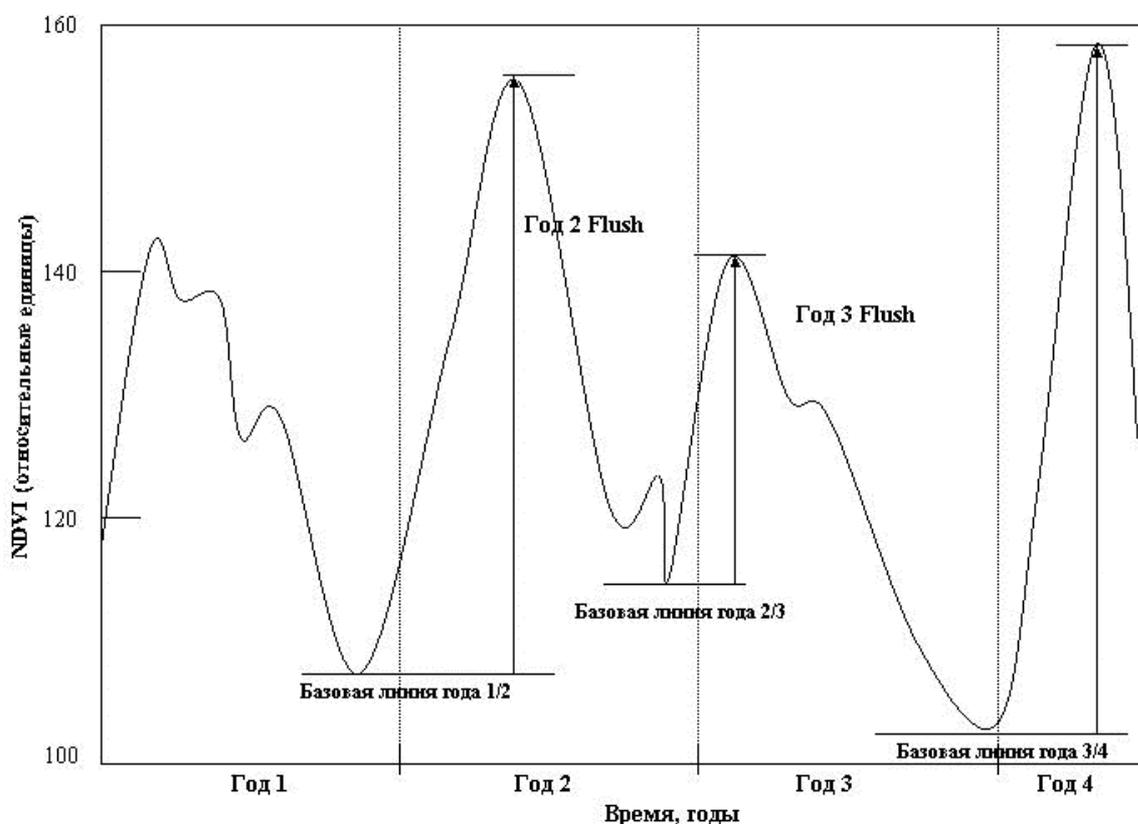


Рис. 1. Изменение хода NDVI в течение 1993-1996 годов, «базовой линии» и «всплесков» «flush» для пастбища в Западной Австралии

Влияние состояния растительности текущего от предыдущего года показана в работе [12], где авторы проанализировали данные NDVI для 4 вегетационных сезонов, полученные на территорию Западной Австралии. В зависимости от состояния растительности в эти годы минимальные и максимальные значения этого индекса сильно изменялись. Минимальные значения предыдущего года он предложил считать «базовой линией» (baseline) по отношению к текущим данным (рис.1). Изменение NDVI от «базовой линии» до максимально высокого значения за год было названо максимальным растительным откликом или «вспышкой» (“flush”). То есть величина “flush” для текущего года равна разности максимального значения NDVI текущего года и минимального значения NDVI предыдущего года. А для того чтобы оценить состояние растительности любого заданного года используют следующее уравнение (приведен пример для вычисления состояния растительности в 1994 году при анализе данных 1993-1996 годов): $(NDVI_{\max, 1994} - NDVI_{\text{baseline} '93-94}) / \max[NDVI_{\max, \text{year}} - NDVI_{\text{baseline} ' \text{year}}]$ или $\text{flush}_{94} / \max[\text{flush}_{\text{population}}]$, где знаменатель – это максимальный “flush” за ряд наблюдаемых лет. Данный подход позволяет проследить рост и развитие растений на заданной территории в историческом аспекте.

2.3. Выявление состояния растительности в тепловом диапазоне съемки

2.3.1. Использование данных, полученных в дневное время суток

Рост температуры листа является хорошим показателем критического содержания влаги в растениях и предшествует началу засухи. Увеличение теплового отклика от листа растения может появиться даже когда растения ещё зелёные, т.к. устьица сжимаются, чтобы минимизировать потерю воды на испарение. Это приводит к уменьшению скрытого теплового потока. Однако для соблюдения баланса энергетических потоков происходит увеличение обнаруживаемого теплового потока, что, в свою очередь, приводит к увеличению температуры листа. Критическое содержание влаги в растениях наступает, когда потребность в воде больше, чем её реальное содержание в почве.

Коган [2] предложил «Индекс температурного режима» (TCI), который может быть вычислен только из долговременных серий дневных AVHRR данных температуры земной поверхности:

$$TCI_j = - [(T_{\max} - T_{sj}) / (T_{\max} - T_{\min})] * 100\%,$$

где TCI_j – это индекс температурного режима для j-ой даты; T_{sj} – температура земной поверхности для j-ой даты; T_{max} – это максимальная температура земной поверхности из всех снимков по всем датам; T_{min} – это минимальная температура земной поверхности из всех снимков по всем датам. Автор показал, что использование тепловых каналов съемки увеличивает точность мониторинга засухи, помогает объяснить температурный вклад для анализа возникновения засухи, а также обеспечивает полезную информацию для мониторинга растительного стресса, обусловленного почвенными условиями.

Ощутимое преимущество этого метода заключается в том, что для вычислений требуются только данные дистанционного зондирования, т.е. серии дневных снимков в тепловом диапазоне. Недостатком является то, что на дневные измерения в тепловом диапазоне влияют метеорологические условия (температура воздуха, скорость ветра, влажность и т.д.), ежедневные колебания которых трудно учитывать.

Д.Л. Джупп и др. [13] использовали дневные снимки Австралии в тепловом диапазоне для отслеживания важных (для принятия решений) условий окружающей среды. Они предложили «Температурный индекс нормализованной разности» (NDTI), для того, чтобы убрать сезонные отклонения в анализе дневной температуры поверхности почвы, полученной с сенсоров AVHRR. Индекс NDTI считается по формуле:

$$\text{NDTI} = \frac{T_{\infty} - T_s}{T_{\infty} - T_0},$$

где T_{∞} – это температура поверхности, смоделированная при условии бесконечного сопротивления поверхности, т.е. при эвапотранспирации ET равной нулю; T_s – это поверхностная температура, наблюдаемая сенсорами AVHRR; и T_0 – это температура поверхности, смоделированная при условии нулевого сопротивления поверхности (т.е. при ET максимальной). Отсюда эвапотранспирация (ET) равна потенциальной эвапотранспирации (ET_p). Этот индекс является синтезированным и используется как дневные тепловые съемки ДЗЗ, так и метеорологические данные. T_{∞} и T_0 могут быть найдены как температуры, физически ограниченные сверху и снизу для данных метеорологических условий и поверхностного сопротивления. Они определяют границы, в которых поверхностные температуры, определенные по данным AVHRR могут изменяться. Если T_s близка к величине T_0 , то это указывает на влажные условия роста. Напротив, если T_s ближе к величине T_{∞} , то это указывает на засушливые условия. Заметим, что NDTI очень похож на CWSI. Если CWSI стремится к нулю, то NDTI будет стремиться к единице.

У индекса NDTI существует ряд преимуществ перед CWSI:

1. NDTI очень точно соответствует реальной влажности, т.е. $\text{NDTI} \approx \text{mad}$. NDTI может быть использован в качестве стандартного продукта – реальной влажности, который вычисляется автоматически. Были разработаны необходимые технологии получения T_0 и T_{∞} для определённого времени и даты прохода спутника.

2. Когда NDVI высокий, NDTI тоже высокий, поскольку они оба характеризуют состояние растительности. Однако максимальные значения этих индексов не совпадают по времени, так как NDTI характеризует наступление метеорологической засухи, а NDVI – сельскохозяйственной.

NDTI более чувствителен к началу водного стресса у растений, чем NDVI, так как на данном этапе засухи, то есть в начале периода обезвоживания количество хлорофилла в растениях не уменьшается.

2.3.1. Использование данных, полученных в дневное и ночное время суток

Разница между дневной и ночной температурой поверхности земли является функцией тепловой инертности системы. Она зависит от количества воды в окружающей среде. Для данной окружающей среды при других одинаковых условиях ежедневный температурный ряд влажной поверхности будет меньше, чем сухой. Эта теория была применена в ряде исследовательских моделей, которые показали перспективу метода тепловой инерции для составления карт влажности почвы [14,15, 16].

Для составления карт почвенной влажности предложено использовать данные тепловой съемки с геостационарных спутников [17]. Отношение dT_s/dS , где T_s – температура поверхности и S – поверхностная плотность потока солнечного излучения, показывает изменение влажности почвы. Наиболее устойчивая взаимосвязь между поверхностной температурой земли и индексом осадков, полученным накануне отмечена между 8 и 10 часами утра, причем для кукурузы это значение составляет 74 %, а для зерновых культур – 64% .

Хорошее соотношение между тепловой инертностью и влажностью вспаханной почвы было выявлено [18] на территории Северной Китайской Равнины. Исследования были проведены для трёх различных по механическому составу типов почв, таких как пески, суглинки и глины. Результат показал, что моделирование тепловой инерции может быть использовано для определения объёмного содержания влаги в почве с достаточной степенью точности (относительная ошибка около

около 10%). Эти соотношения использовались для оценки влажности почвы весной в начале растительного сезона с целью мониторинга засухи на территории Северной Китайской Равнины.

2.4. Определение состояния растительности путем комбинирования данных тепловых и отражательных спектральных каналов

Комбинированием тепловых и отражательных каналов оценивают эвапотранспирацию, разделение компонент энергетического баланса, состояние поверхностной влажности почвы, классификацию земельных покровов. Более полное описание параметров, касающееся выявления засухи представлено в работе [19]. Отмечено, что при наступлении засухи между температурными параметрами и NDVI существует отрицательная корреляция. Отрицательная корреляция между поверхностной температурой и вегетационными спектральными индексами связана с разным испарением растительностью и почвами. При полном растительном покрове, когда вегетационный индекс имеет максимальное значение, наблюдается преимущественно транспирация воды растительностью, в то время как при открытой почве испарение от поверхности осуществляется почвой. При этом влажность почвы при увеличении температуры уменьшается. Схематическое представление пространства поверхностной температуры и вегетационных индексов и концептуальные связи с испарением почв, транспирацией растений и растительным покровом показаны на рис.2 [20]. В качестве тепловой компоненты используют как NDTI, так и T_s .

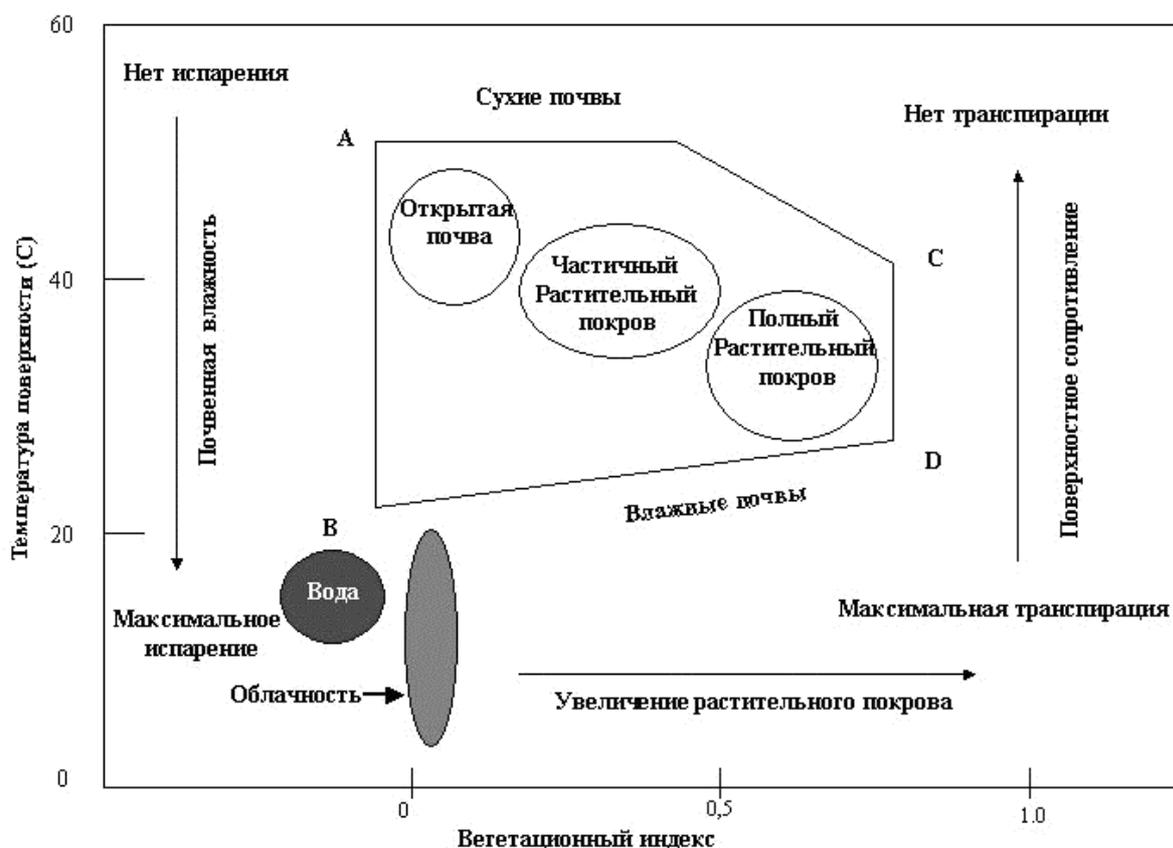


Рис. 2. Схематическое представление пространства поверхностной температуры и вегетационных индексов и концептуальные связи с испарением почв, транспирацией растений и растительным покровом

Анализ графика показывает [21], что угол наклона кривой $T_s/NDVI$ отрицательно коррелирует с индексом влажности посевов. При полном растительном покрове он зависит от устойчивости (resistance) покрова. «Теплые кромки (warm edge)» – границы графика в пространстве $T_s/NDVI$ – могут быть найдены с определенной степенью достоверности путем нахождения эмпирической взаимозависимости, полученной из графиков наклона $T_s/NDVI$, для вычисления которой требуется достаточно большой ряд растительности в разном состоянии. Поэтому для интерпретации данных этот индекс используют в комплексе с дополнительной вспомогательной информацией и моделями. Предложено два метода в представлении данных. Первый – это подход, основанный на последовательности углов наклона кривых $T_s/NDVI$, которые вписаны в треугольник [22, 23]. Вторым – «Растительный индекс/температурная трапеция» (VITT) – это модификация «Индекса критического содержания воды в посевах» (CWSI), который соответствует идее вписывания данных в трапецию [24].

Для данных с AVHRR было показано [22] на двух сельскохозяйственных участках в США, что график в пространстве T_s и $NDVI$ имеет форму треугольника. Углы этого треугольника соответствуют природным объектам в разном состоянии, т.е. растительности, мокрой почве и сухой почве. Промежуточные фракции соответствуют разному положению точек внутри треугольника, что позволяет оценить дневную эвапотранспирацию и произвести соответствующие расчеты и картирование региона. Преимущество подхода $T_s/NDVI$ над другими методами заключается в том, что при определении эвапотранспирации данным методом нет необходимости вычислять модель энергетического баланса для каждой точки изображения. Достаточно найти местоположение точки в координатах «теплых кромок (warm edge)», используя изолинии влажности, полученные из модели переноса почва – растительность – атмосфера [23]. Нормализуя $NDVI$ и поверхностную температуру и меняя изолинии в данных можно преобразовать данные $T_s/NDVI$ в значения почвенной влажности. Стандартная ошибка сравнения индекса, полученного по данным самолетной съемки и наземными измерениями поверхностной влажности составляла 16% [25]. Использование подхода «треугольников» позволило оценить влажность подповерхностной и поверхностной части почвы пятнистой растительности [26].

Модифицированный индекс VITT был использован [24] как составная часть индекса CWSI для частично покрытых растительностью регионов без априори известных знаний о процентном проективном покрытии растительности. Данные, использованные в работе, получены Мультиспектральным радиометром, являющимся аналогом LANDSAT TM и получены на регионы с разными ирригационными режимами. Результаты, проверенные на контрольных участках, дали хорошие результаты. Апробирование VITT провели также в естественных изменяющихся условиях, используя данные с LANDSAT TM для 8 дат в течение сезона 1992 года в полусухой части Аризоны [27]. Были собраны данные температуры воздуха на различные участки. Затем был построен график, по одной оси которого были отложены разности поверхностной температуры и температуры воздуха, а по другой – «Почвенный уточненный вегетационный индекс» (SAVI) для нескольких биом. Для некоторых из них были получены хорошие результаты, особенно для луговых и пастбищных сообществ. Однако авторы отмечают, что для больших территорий, например для всей Австралии эта модель не работает, так как нужны метеорологические наблюдения с частой сети станций.

Описанные модели, учитывающие вписывание данных в треугольник или в трапецию, имеют много общего, так как они основаны на «тепловых гранях», представляющих собой линию между точкой, соответствующей сухой открытой почве и точкой, соответствующей полному растительному покрову. Для трапеции добавляется точка, соответствующая полному растительному покрову, находящемуся в состоянии стресса. При помощи этих моделей для любой точки изображения, если известен растительный покров и поверхностная температура, может быть вычислено отношение действительной эвапотранспирации (ET) к потенциальной. Его вычисляют как расстояние от «теплой грани» до точки, соответствующей измеренному растительному покрову. Верхняя сто-

рона трапеции может не образоваться, формируя треугольник и указывая на отсутствие определенной фазы растительности. Изменение формы набора данных происходит в процессе вегетации.

Для использования представленных моделей при мониторинге растительности все изображения должны быть калиброваны, предварительная обработка исходных данных должна включать радиометрическую и атмосферную коррекцию.

Комбинация индексов, основанная на тепловых и отражательных свойствах природных объектов была предложена в работе [2]. Использовались индексы VCI и TCI для определения стресса растительности, обусловленного повышенными температурами и дефицитом влажности, как на больших территориях с разнообразными природными условиями в нескольких природных зонах мира, так и на региональном уровне. Для этой цели вычислялись средние значения VCI-TCI для данного региона и для каждой недели вегетационного сезона и сравнивались с урожаями сельскохозяйственных культур. Результаты показали хорошую корреляцию между этими индексами и урожаем, особенно в течение критического периода роста растений.

Индекс, обратный VITT был использован в Китае [28] для мониторинга засухи. Этот индекс назван WSVI (The Water Supplying Vegetation Index), т.е. «Вегетационный индекс водных запасов». Он основан на тех же законах, что и описанные выше индексы, включает два параметра (NDVI и температуру) и показывает влияние засухи на сельскохозяйственные культуры, что позволяет картировать засуху на больших участках. Индекс WSVI представляет собой отношение NDVI к поверхностной температуре, определяемой в 4 спектральном канале AVHRR, т. е.

$$WSVI=NDVI/Ts.$$

Когда растительность страдает от засухи, WSVI уменьшается.

В США [29] с 1998 года проводятся наблюдения за появлением и развитием засухи в странах разных континентов по данным NOAA/AVHRR. При мониторинге засухи используют индекс VCI/T4. Значения индекса для Эфиопии колеблются в следующих пределах:

- благоприятные условия для роста растительности > 75;
- нормальные условия для роста растительности – 40-50;
- слабая засуха – 30-40;
- сильная засуха – 10-30.

В результате исследований на примере Эфиопии выяснилось, что индекс VCI/T4 позволяет разделить метеорологическую засуху от сельскохозяйственной, так как сильная метеорологическая засуха наступила в мае по всей территории страны, а слабая сельскохозяйственная засуха наступила только в конце июня и в отдельных регионах. Авторы объясняют это явление накоплением влаги в почве после обильных дождей в феврале-апреле, которая компенсировала недостаток осадков в последующие месяцы и предотвратила развитие растительного стресса в сухой период и потерю урожая.

Для мониторинга засухи в 1997 году в Папуа Новая Гвинея [30] использовали серии снимков, состоящие из 8 недельной подборки, полученные с радиометра высокого разрешения, установленного на спутнике NOAA. Для вычисления NDVI и Ts использовались пиксели, не включающие облачность. Были также внесены некоторые изменения в алгоритм определения облачности: (1) изменена пороговая величина; и (2) не тестировалась пространственная связь. Ts была посчитана способом разделенного окна, который использует разницу в атмосферном поглощении в 4-ом и 5-ом каналах AVHRR:

$$Ts=5.54+T4+2.08 \Delta T4,5,$$

где T4 яркостная температура в 4-ом канале AVHRR, и $\Delta T4,5$ разница между яркостными температурами в 4-ом и 5-ом AVHRR каналах. Коэффициенты для сенсоров AVHRR, размещенного на борту спутника NOAA-14, были получены в работе [31].

Временные серии соотношения $T_s/NDVI$ являются быстрым показателем засухи. Временная изменчивость температуры воздуха, длины дня и суммарного испарения в Папуа Новая Гвинея незначительны в течение года. Это означает, что множество временных изменений, наблюдаемых в соотношении $T_s/NDVI$, могут быть приписаны изменениям в уровне осадков.

При использовании комбинированных индексов наряду с дневными тепловыми данными было предложено использовать ночные тепловые данные [32]. Анализ ряда ночных и дневных изображений в сезон засухи и во влажный год показал, что сельскохозяйственная засуха характеризуется не только повышенными дневными, но и повышенными ночными температурами. Вероятно, понижение температур ночью приводит к образованию росы и туманов, то есть к конденсации паров воды на растениях, что позволяет избежать растениям стресс от обезвоживания. В этом случае наступление атмосферной и почвенной засухи не приведет к развитию сельскохозяйственной засухи. Поскольку при наступлении засухи вегетационный индекс падает, а температуры подстилающей поверхности растут, то для более точного определения момента наступления засухи и территории ее распространения предложено использовать «Индекс засухи» ID (Index of Drought), который прямо пропорционален сумме ночной и дневной температур и обратно пропорционален значению нормализованного вегетационного индекса.

Индекс «засухи» вычисляется по следующей формуле:

$$ID = (T_{4д} + T_{4н}) / NDVI,$$

где $T_{4д}$ и $T_{4н}$ – (максимальная) дневная и (минимальная) ночная температуры за сутки всего наблюдаемого участка, полученная в 4 спектральном канале AVHRR (или в аналогичном спектральном диапазоне другой съемочной аппаратуры), NDVI – нормализованный вегетационный индекс. Очевидно, что чем выше значения индекса ID, тем больше вероятность того, что на исследуемой территории наблюдается засуха. Для территории Поволжья и Заволжья значения индекса ID в июне от 1000 до 1400 являются нормальными, значения индекса от 1400 до 1600 свидетельствуют о средней и сильной засухе, а свыше 1600 – катастрофической засухе.

Но засуха – это только одна причина, которая влияет на уменьшение NDVI и увеличение T_s . Существует ряд других факторов, которые могут вызвать изменения в показаниях AVHRR по NDVI и T_s . Они включают: (1) изменения в наземных покровах, такие, как горение, сельскохозяйственная обработка земель и рубка леса, сбой сенсоров, некорректное проведение атмосферной коррекции в сигнале $T_s/NDVI$ между последовательными снимками и т.д.

Выводы

1. Использование данных ДЗЗ при выявлении засухи позволит более оперативно, а значит эффективно применять соответствующие меры для защиты растений.
2. Долговременные и многолетние серии индексов позволят правильно распределять набор сельскохозяйственных культур по территории и делать долговременные прогнозы урожаев.
3. Использование комбинированных индексов, в том числе и ночных тепловых съемок, обеспечивает непосредственное распознавание засухи, не требует наземных метеорологических данных и является экономически выгодным.

Литература

1. *Idso S.B., Jackson R.D.* Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. // *Agricultural Meteorology*. N 24. P. 45-55.
2. *Kogan F.N.* Global drought watch from space // 1997. *Bulletin of the American Meteorological Society*. N 78. P. 621-636
3. *Kogan, F.N.* 1987: Vegetation index for areal analysis of crop conditions. Preprints, Proc.18th Conf. Of Agricultural and Forest Meteorology, West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc., 103-107
4. *Асмус В.В., Щербенко Е.В.* Использование измерений спектротрических комбинаций для оценки растительности и почв. Обзорная информация ВНИИГМИ-МЦД, Обнинск, 1989, 55 стр.
5. *Виноградов Б.В.* Дистанционное измерение фитомассы. // *Исследование Земли из космоса*. – 1982. – №5. с. 36 – 45.
6. *Рачкулик В.И., Ситникова М.В.* Методические указания по определению параметров растительного покрова методом отношения коэффициентов яркости в двух участках спектра (по наземным, самолетным и вертолетным измерениям)ю – ташкент: САНИГМИ, 1972. – 39 с.
7. *Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В.* Климатология засухи на юго-востоке Русской равнины по спутниковым данным. *Исследование Земли из космоса*, 2004, № 1, с. 83-89.
8. *Lui W.T., Kogan F.N.* Monitoring regional drought using the vegetation condition index. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1996, p.p. 2761 – 2782.
9. *Reed B.C.* Using remote sensing and Geographic Information Systems for analyzing landscape/drought interaction. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1993, p.p. 3489 – 3503.
10. *Tuddenham W.G., Le Marshall J.F.* The interpretation of NDVI data and the potential use of a differential technique for monitoring time sequential changes in vegetation cover. In *Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology*, 1-4 October, Brisbane, Australia, 1996, pp.57-61.
11. *Tuddenham W.G., Le Marshall J.F., Rouse B.J., Ebert E.E.* The real time generation and processing of NDVI from NOAA-11: a perspective from the bureau of meteorology. In *Proceedings of the 7th Australian Remote Sensing Conference*, 1-4 March, Melbourne, Australia, p.p. 495-502.
12. *Cridland S., Burnside D., Smith R.* The NDVI – use in rangeland management. In *Proceeding of the 5th International Rangelands Congress*. Salt Lake City, Utah, 1995, 23-28 July, pp. 105-106. Society of Range Management, Denver.
13. *McVicar T.R., Jupp D.I.* Estimating meteorological data at the times of remotely sensed data acquisition from standard daily meteorological data. *Agricultural and Forest Meteorology* (submitted).1998.
14. *Pratt D.A., Ellyett C.D.* The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology. *Remote Sensing of Environment*, 1979, №86 зз. 151-168.
15. *Pratt D.A., Ellyett C.D., McLauchlan E.C., McNabb P.* Recent advances in the application of thermal infrared scanning to geological and hydrological studies. *Remote Sensing of Environment*, 1978, №7, p.p.177 -184.
16. *Xue Y., Cracnell A.P.* Advanced thermal inertia modeling. *International Journal of Remote sensing*, 1995, №16, p.p.453-459.
17. *Wetzel P.J., Atlas D., Woodward R.H.* Determining soil moisture from geosynchronous satellite infrared data: a feasibility study. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 1984, № 23, pp. 375 -391.
18. *Zhang R.* Improved thermal inertia model and remote sensing of soil moisture. *Geographical Research*, 1990, № 9, p.p. 101 -112.

19. *McVICAR T.R., P.N. BIERWIRTH* “Rapidly assessing the drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery” *INT. J. REMOTE SENSING*, 2001, NO. 11, 2109-2128.
20. *Lanbin E.F., Ehrlich D.* The surface temperature – vegetation index space for land cover and land –cover change analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, № 17 p.p.463 – 487.
21. *Nemani R., Pierce L.L., Running S.W., Goward S.N.* Developing satellite derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, № 32, p.p. 548 – 557.
22. *Price J.C.* Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Trans Geoscience and Remote sensing*, 1990, № 28, p.p.940 – 948.
23. *Gillies R.R., Carlson T.N.* Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporating into climate models. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, № 34, p.p.745 – 756.
24. *Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal A.* Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote sensing of Environment*, 1994, № 49, p.p. 246 – 263.
25. *Gillies R.R., Carlson T.N., Cui J., Kustas W.P., Humes K.S.* A verification of the “triangle” method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from the remote measurements of the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, № 18, p.p. 3145 – 3166.
26. *Carlson T.N., Gillies R.R., Perry E.M.* A method to make use of thermal infrared temperatures and NDVI measurements to infer soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 1994, № 9, p.p.161 – 173.
27. *Moran M.S., Rahman A.F., Washburne J.C., Goodrich D.C., Wertz M.A., Kustas W.P.* Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, № 80, p.p.87 – 109.
28. Drought Monitoring in China with WSVI, National Satellite Meteorological Center (NSMC), Beijing, China, <http://margotte.univ-paris1.fr/cgms/en/ap4-11.htm>
29. Early Drought Detection and Watch. <http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom/ceos1/casestud/felix/felix4.htm>
30. *McVICAR T.R., P.N. BIERWIRTH* “Rapidly assessing the drought in Papua New Guinea using composite AVHRR imagery” *INT. J. REMOTE SENSING*, 2001, NO. 11, 2109-2128.
31. *Chajikowski K.P.* Impact of AVHRR filter functions on surface temperature estimation from the split window approach // 1998. *Int. J. Of Remote Sensing*, 19, 2007-2012.
32. *Щербенко Е.В.* Мониторинг засухи по данным космических съемок. В настоящем сборнике.