

Комбинированный индекс температурных условий и его применимость к описанию состояния сельскохозяйственной вегетации Казахстана

А.Г. Терехов¹, Н.Г. Макаренко^{1,2}, И.Т. Пак¹

¹ *Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК
Алматы, 050010, Казахстан*

E-mail: aterekhov1@yandex.ru

² *Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140, Россия*
E-mail: ng-makar@mail.ru

В работе рассматривается модификация шкалы индекса температурных условий (Temperature Condition Index) и проверяется его эффективность для сельскохозяйственной вегетации Казахстана. Для описания состояния подстилающей поверхности по данным спутникового мониторинга обычно используются два класса индексов в относительных шкалах. Первая из них, шкала состояний, взвешивает текущее значение в диапазоне многолетних вариаций. Ее недостатком является чувствительность к большим флуктуациям вариаций, вызванных редкими выбросами. Вторая, шкала аномалий, показывает, насколько текущие значения отличаются от средних величин. Отклонение от среднего уменьшает нестационарность ряда, но затрудняет интерпретацию индексов. Предлагаемое изменение шкалы состояний добавляет к двум базовым параметрам (минимуму и максимуму ряда отсчетов) третий – среднее арифметическое значение ряда, которое фиксирует середину шкалы взвешивания исходных отсчетов. Предложенная модификация удобна для данных со значительным куртозисом (асимметрией) в плотности распределения данных. Мы приводим результаты сравнительного анализа предложенного варианта индекса состояний с традиционными шкалами. В качестве данных использовался глобальный продукт NEO – Land Surface Temperature anomaly, с разрешением 0,1 градус и 8-дневным периодом обновления. Показана эффективность модифицированной шкалы для ассиметричных данных. Мы надеемся, что это позволит улучшить информационную основу для диагностики условий роста и развития яровых культур, а также состояния вегетации в течение всего вегетационного сезона.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиояркостьная температура поверхности Земли, индекс температурных условий, состояние вегетации, диагностика условий увлажнения.

Введение

Состояние растительного покрова может диагностироваться с помощью различных параметров подстилающей поверхности регистрируемых на орбитальных платформах. Одним из информативных параметров является радиояркостьная температура суши (Land Surface Temperature [LST]) (Lambin, Ehrlich, 1995). Этот параметр рассчитывается по интенсивности уходящего ИК-излучения от безоблачной поверхности Земли в каналах дальнего ИК диапазона. Обычно используется несколько каналов в диапазоне длин волн около 14 мкм, где существуют окна прозрачности атмосферы (Зуев, 1966). Восстановление температуры идет в предположении излучения «абсолютно черного тела» согласно формуле Планка с учетом атмосферной коррекции (Афонин, 2012). Полученная радиояркостьная температура суши тесно связана с состоянием поверхности Земли, температурой и влажностью поверхности почвы, наличием и архитектурой растительного покрова, температурой и влажностью воздуха, наличием ветра и прочими факторами, влияющими на температурный баланс.

Абсолютные значения радиояркостьной температуры суши, полученные на спутнике, имеют сложную связь со стандартными метеорологическими наземными характеристиками, такими как температура поверхности почвы (слой 1-5 см), скорость ветра, температура воздуха на высоте 2 метра и пр. Для диагностики пространственно неоднородных и неста-

бильных во времени видов подстилающей поверхности, например, сельскохозяйственных земель в течение вегетационного сезона, проще и эффективнее использовать относительные шкалы значений радиояркостной температуры.

Зоны возделывания пропашных яровых неполивных культур в Казахстане, а это в основном зерновые (пшеница и ячмень), относятся к территориям рискованного земледелия по фактору недостатка увлажнения. Поэтому практически не существуют условий «избытка или недостатка тепла». Тепло всегда в избытке, и фактором лимитирующим развитие культуры является увлажнение. В этих условиях радиояркостная температура (Land Surface Temperature) диагностирует уровень увлажнения освещенной Солнцем поверхности. Развитое проективное листовое покрытие или увлажненная поверхность почвы (например, в период до начала активной вегетации культуры) обеспечивает более высокий уровень эвапотранспирации с листовой поверхности и испарения с почвы, что, соответственно, приводит к понижению относительных значений радиояркостной температуры. При прочих равных условиях, чем ниже влажность подстилающей поверхности, тем выше ее температура. Влияние на LST температуры окружающего воздуха, регистрируемого метеостанциями на высоте 2 м, не столь значительно. Например, освещенные Солнцем сухие темные поверхности и в зимний период при отрицательных температурах воздуха способны нагреваться весьма сильно.

1. Постановка задачи

При обработке данных спутникового мониторинга для описания состояния подстилающей поверхности наиболее часто используются два класса индексов, рассчитываемых в относительных шкалах. Первая – шкала состояний, взвешивающая текущие значения в диапазоне многолетних вариаций (Min – Max), например, описанная в (Kogan, 1995). Вторая – шкала аномалий, показывающая, насколько текущие значения отличаются от средних величин.

Обе шкалы относительных единиц имеют свои сильные и слабые стороны. Шкала состояний дает интуитивно понятную оценку текущего состояния в единицах существующих многолетних вариаций анализируемого параметра в данном месте в данное время. Однако используемая шкала взвешивания не устойчива к аномальным выбросам (Min, Max), которые, накапливаясь в шкале взвешивания, искажают значения всего соответствующего временного ряда отсчетов. Шкала аномалий более устойчива, поскольку среднее значение ряда не так чувствительно к отдельным выбросам. Но практический смысл оценок в шкале аномалий более сложен, что затрудняет понимание и последующую тематическую обработку результатов спутниковой диагностики.

В Казахстане чем ниже температура в шкале относительных оценок (TCI), тем более благоприятны условия для роста и развития однолетних яровых культур. TCI=0 – это лучшие условия, TCI=100 – худшие. При этом из-за аномально жарких погодных условий, не имеющих в многолетнем архиве спутниковых данных своего аналога в виде столь же значимо низких температур, середина шкалы TCI (вариации от Min=0 до Max=100),

равная 50, часто не соответствует средним многолетним условиям. Этот диссонанс затрудняет совмещение данных TCI со стандартными агрометеорологическими параметрами, опирающимися на средние характеристики.

В данной работе развивается схема построения модифицированного индекса температурных условий более устойчивого к аномальным выбросам значений радиояркостной температуры и адаптированного для оценки состояния однолетних яровых сельскохозяйственных культур в течение всего вегетационного сезона. В случае отсутствия в архиве спутниковых данных погодных аномалий в виде очень высоких температур модифицированный индекс TCI будет мало отличаться от обычного TCI. И его недостатком будет только несколько более сложная схема расчета. В случае присутствия в архиве данных аномально жаркой погоды, например, условий 2010 года, модифицированный индекс будет обеспечивать более корректные оценки значений TCI в области середины шкалы.

2. Спутниковые данные

Регистрация интенсивности уходящего ИК-излучения от подстилающей поверхности Земли осуществляется во многих орбитальных природоресурсных спутниковых системах. Через Интернет доступен целый ряд продуктов тематической обработки в формате радиояркостной температуры подстилающей поверхности (LST) или основанных на ней оценок. Часть продуктов стандартизирована и выставляются в режиме мониторинга с глобальным охватом. Это продукты различных научных групп, наиболее популярными среди которых являются данные NASA [<http://earthobservatory.nasa.gov>] и USGS [<http://glovis.usgs.gov>]. Базовый алгоритм расчета LST в обоих продуктах близок, различия в основном касаются пространственно-временных спецификаций. Для глобальных продуктов NEO (NASA Earth Observation) существуют варианты суточных, 8-суточных и месячных данных. По пространственной детализации лучшие данные этой группы имеют разрешение 0,1 градус (около 10 км). Архив основан на данных спутниковой системы EOS MODIS (Terra, Aqua) и имеет глубину с мая 2000 года.

При тематическом применении LST продуктов в сельскохозяйственных приложениях пространственное разрешение не играет такой большой роли, как например, в случае вегетационных индексов. Погодные характеристики в шкале [холодно/влажно – жарко/сухо] для территории Средней Азии достаточно консервативны и пространственно однородны на временном масштабе вегетационного сезона. Нетипичны пространственно резкие изменения, и практически отсутствует мелкомасштабная мозаичность. Например, в условиях региональной засухи невозможно локальное присутствие систематически холодных и влажных погодных условий в отдельно взятом районе. Поэтому для диагностики пахотных земель можно привлекать спутниковые данные низкого пространственного разрешения (0,1 градус) и использовать грубые (диагностические) маски пахотных площадей.

Для диагностики температурного режима подстилающей поверхности в задаче мониторинга состояния пахотных земель наиболее перспективным представляется спутниковый продукт NEO [Land Surface Temperature anomaly, DAY] с 8-дневным окном накопления и пространственным разрешением 0,1 градус. В формирование этого продукта привлекаются данные со спутника EOS MODIS [Terra] в формате MOD11 [https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table].

На сайте [<http://earthobservatory.nasa.gov>] доступна информация периода с мая 2000 по текущий момент в виде глобальных сцен (матрица размером 1800x3600 пикселей). Каждый элемент матрицы отражает отклонение радиояркостной температуры от средней температуры для данного пикселя в соответствующем календарном временном окне накопления. Средние значения получены обработкой данных за период 2000-2012 гг.

3. Методика обработки

За основу описания температурных условий был взят известный индекс (Temperature Condition Index [TCI]) предложенный в работе (Kogan, 1995). Он используется при обработке данных многолетнего мониторинга. Принцип его расчета сводится к анализу значений радиояркостной температуры в каждом элементе регулярной матрицы в определенное календарное время в течение всех имеющихся лет мониторинга. Из ряда календарно синхронизированных значений за разные года берется самое низкое и самое высокое значение радиояркостной температуры. Они формируют относительную линейную шкалу условных единиц, где $Min = 0$; $Max = 100$. Затем все значения ряда пересчитываются в условные единицы TCI, пример практического расчета приведен в *табл. 1*.

Данная шкала неустойчива к появлению аномально высоких или низких значений, которые являются следствием погодных аномалий или влиянием следов облачного покрова. Появление аномально высокого значения, принятого за 100, уменьшает величины всех остальных членов ряда отсчетов. Таким образом, формируются искажения в значениях элементов конечных матриц TCI. Например, среднее арифметическое ряда отсчетов может значительно отличаться от середины шкалы TCI (значение 50).

Для уменьшения значимости этого недостатка шкалу TCI предлагается модифицировать. Смысл модификации сводится к усложнению схемы построения шкалы взвешивания за счет использования не двух (Min , Max), а трех базовых элементов шкалы. Предлагается середине шкалы TCI присваивать среднее арифметическое значение временного ряда отсчетов. По сути формируется вариант кусочно-линейной шкалы, состоящий из двух частей: [MIN – среднее]; [среднее – MAX] (*табл. 1*). Данный подход сочетает сильные стороны обоих видов относительных шкал. Дополнительную устойчивость результатам оценки придает использование в качестве середины шкалы TCI среднего арифметического значения ряда, которое слабо зависит от отдельных выбросов в ряду отсчетов. При этом модифицированная шкала TCI определяется фактической многолетней вариабельностью характеристик данного места с со-

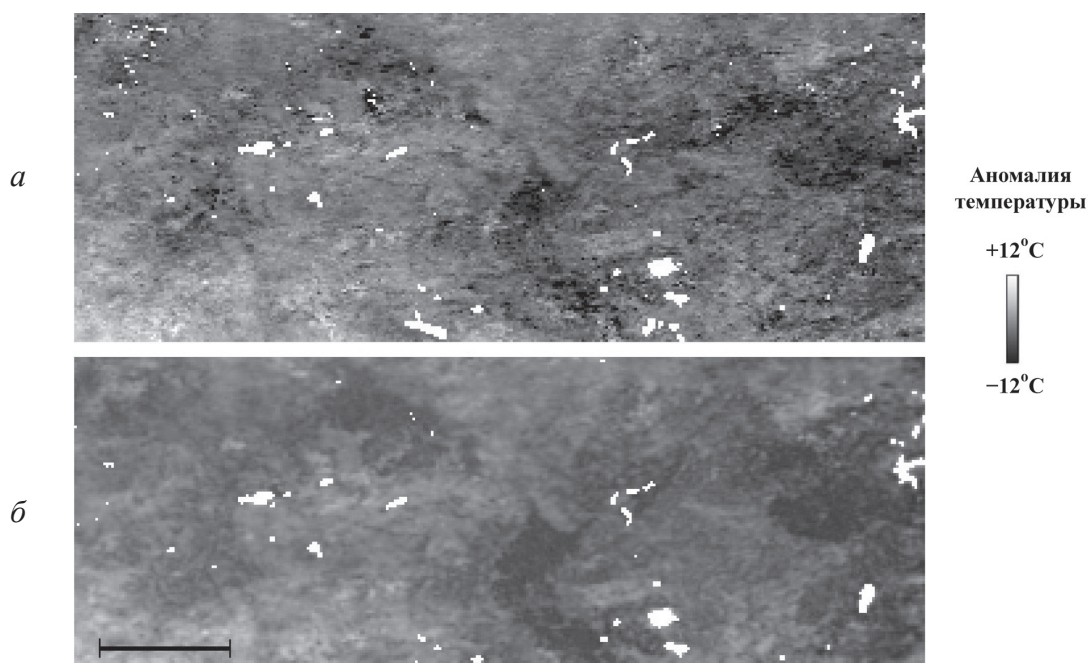


Рис. 1. Пример экспертной фильтрации помех от облачного покрова. Фрагмент территории Казахстана и Сибири, сцена NEO LST-anomaly [Day] за 9-16 мая 2006 года: а) до фильтрации; б) после фильтрации. Исходные данные взяты с сайта [<http://earthobservatory.nasa.gov>]

хранением позиции среднего значения ряда. Результаты взвешивания с помощью такой шкалы становятся более пригодными для количественных оценок, особенно в случаях связанных с агрометеорологическими параметрами, где средние характеристики являются ключевыми.

NEO LST -продукты рассчитываются с помощью автоматических алгоритмов. 8-дневный период накопления данных часто является недостаточным для формирования полностью безоблачного покрытия, даже в условиях резко континентального, сухого климата Центральной Азии. В каждой глобальной сцене присутствуют искажения от влияния облачности, которая в той или иной мере затрагивает анализируемую территорию. Влияние облачности может варьироваться от зон с полным отсутствием данных (все 8 дней периода накопления имели сплошной облачный покров), до искаженных, заниженных значений LST из-за присутствия мелкой облачности или дымок (рис. 1а).

Таким образом, спутниковые продукты NEO LST более корректно отражают температурный режим в случае безоблачных данных, обычно это высокотемпературные режимы, но имеют искажения в низкотемпературных режимах. В автоматических продуктах недостаток безоблачной информации приводит к ошибкам низкотемпературных значений, занижению средних многолетних значений LST и пропуску значений в некоторых местах в отдельные периоды времени. Для тематической обработки продуктов LST в сельскохозяйственных приложениях желательно иметь непрерывные (без пропусков) ряды данных с возможно лучшей коррекцией от влияния облачности.

Для практически значимого мониторинга влияние облачности необходимо минимизировать, искаженные данные откорректировать, зоны с отсутствием данных (сплошной облачный покров) заполнить информацией, например, с помощью интерполяции.

Ввиду разного пространственного масштаба, сложного и многообразного характера влияния облачности на сценах LST-anomaly решение такой задачи оптимально осуществлять через стадию ручной, экспертной коррекции. Пример экспертной фильтрации облачности представлен на *рис. 1б*.

4. Обработка данных LST-anomaly

В классическом алгоритме расчета TCI (Kogan, 1995) используются абсолютные максимумы и минимумы ряда отсчетов, а текущее значение ранжируется в линейной шкале между этими экстремумами, при этом математически не важно, что использовать – LST или LST-anomaly. Расчетные значения TCI в обоих случаях будут идентичны. Трансформация стандартного продукта NEO LST-anomaly [Day] для формирования информационной основы диагностики погодных условий и состояния с\х культур включает расчет модифицированного индекса температурных условий. Мониторинг температурного режима с помощью 8-дневных сцен LST-anomaly в течение вегетационного сезона Центральной Азии (май-август) включает 19 календарных оценок. Архив периода 2000-2014 годов обеспечивает по 14-15 отсчетов в каждом ряду отсчетов, относящемся к определенной календарной дате. Таким образом, информационная основа включает свыше 260 спутниковых сцен, прошедших экспертную фильтрацию искажений от облачного покрова.

Для каждой пиксельной позиции величина аномалии радиояркостной температуры пересчитывается в условные единицы TCI. Новая шкала имеет вариабельность от 0 до 100. Здесь 0 – многолетний минимум (самое сильное отрицательное отклонение текущего значения LST-anomaly от среднего в данной пиксельной позиции в анализируемом календарном периоде); 50 – средняя арифметическая величина в ряде отсчетов (после экспертной коррекции помех от облачного покрова); 100 – многолетний максимум (самое сильное положительное отклонение текущего значения LST-anomaly от среднего). Промежуточные значения строятся на основе линейных аппроксимаций между 0-50 и 50-100. Пример расчета TCI для выбранного локального участка приведен в *табл. 1*.

Различия между величинами TCI, полученными в рамках классической схемы расчета и согласно предлагаемой методике в течение вегетационного сезона для пахотных земель на масштабе сельскохозяйственной области Казахстана, приведены на *рис. 2*.

5. Обсуждение полученных результатов

Различия результатов при использовании обычной и модифицированной шкалы TCI концентрируются в середине шкалы значений и минимальны в случае аномально высоких или низких значений. Также, различия минимальны, когда распределение значений членов ряда отсчетов близко к Гауссовскому виду. Разница становится значимой при асимметричных видах распределений значений ряда отсчетов. Аномальные погод-

Сезонный мониторинг температурных условий (TCI) на поверхности пашни

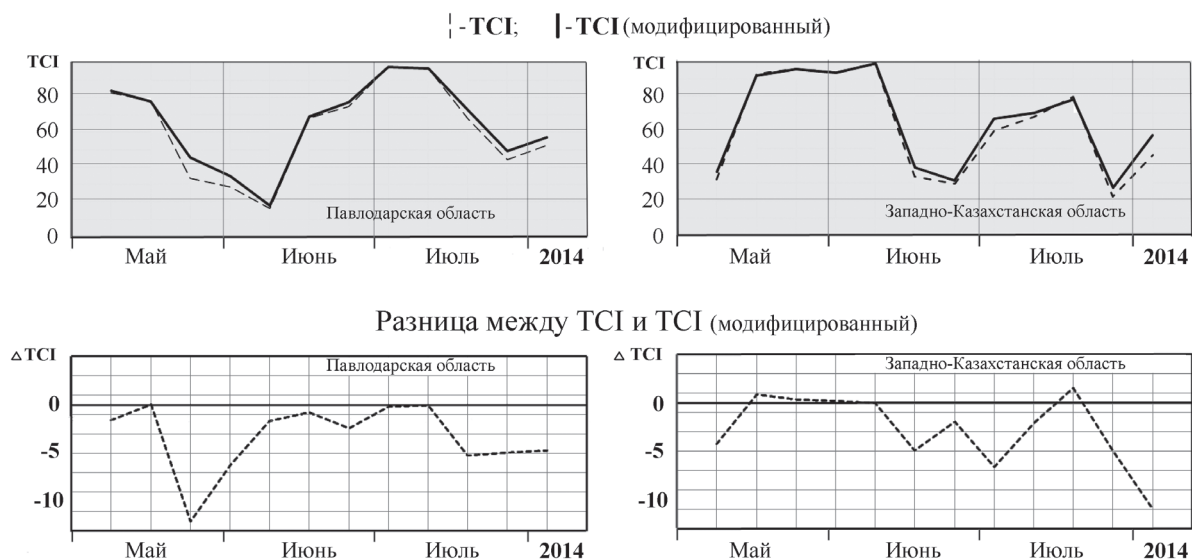


Рис. 2. Сравнительный анализ динамики стандартного TCI [шкала: Min-Max] и модифицированного TCI [шкала: Min-Average-Max] на примере сезонного мониторинга температурного (LST) режима пашни Павлодарской и Западно-Казахстанской областей Казахстана в сезоне 2014 года. Исходные спутниковые данные LST-anomaly (8-дневный композит) взяты с сайта [<http://earthobservatory.nasa.gov>]

ные условия, формирующие температурные максимумы или минимумы, реализуются не очень часто, поэтому период накопления в 14-15 лет, обеспеченный спутниковой съемкой EOS MODIS, для многих территорий недостаточен для накопления представительных и статистически обеспеченных значений экстремумов. Кроме того, сами погодные аномалии могут иметь асимметрию, когда, например, положительные отклонения от среднего многолетнего значения много больше, чем отрицательные. Особую осторожность требуют низкотемпературные аномалии, которые могут быть вызваны влиянием следов облачности.

Таблица 1. Значения элементов многолетнего ряда LST-anomaly (после фильтрации помех облачности) при использовании различных шкал TCI. Сцены за 12-17 июля периода 2003-2013 гг., фрагмент территории Костанайской области Казахстана (пиксельный блок 4x4).

Год	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
LST Anomaly [C°]	-3,95	2,15	-2,15	6,06	-1,72	3,22	-4,16	1,29	-0,29	12,0	1,53
TCI* Min; Max	1,3	39,1	12,5	63,2	15,1	45,7	0,0	33,8	24,0	100	36,2
TCI Min Average Max	2,1	56,0	19,4	72,8	23,4	59,9	0,0	51,1	47,1	100	52,2
Разница между TCI и TCI*	0,8	16,9	6,8	9,6	8,3	14,2	0	17,3	23,1	0	15,9

Последние годы для зерносеющих регионов Казахстана отличались наличием остро-засушливых лет с аномально высокими летними температурами, например 2010 и 2012 годы. Поэтому температурный максимум в имеющихся спутниковых данных 2000-2013 гг. много существеннее, чем температурный минимум. Для примера, приведенного в *табл. 1*, эти значения, соответственно, равны: максимум [+12 градусов] от автоматически определяемого среднего, минимум [-4,157 градусов]. После проведения экспертной коррекции для удаления влияния облачности средняя арифметическая температура ряда отсчетов несколько растет, в данном случае до +1,057 градусов от автоматически определяемого среднего, но все равно асимметрия остается весьма существенной.

Значимо асимметричное распределение величин LST-anomaly в ряду отсчетов затрудняет применение стандартной схемы расчета TCI в прикладных, количественных оценках. Значения отсчетов, близкие к средним значениям, занижаются (см. *табл. 1* и *рис. 2*), что затрудняет трактовку этих данных. Модифицированная шкала TCI, за счет использования среднего арифметического по ряду отсчетов в качестве середины шкалы, дает более устойчивые оценки радиоярких температур, сохраняя оценку среднего уровня как среднего, без смещений, вызванных недостаточным объемом накопленной информации при формировании шкалы взвешивания TCI или другими причинами. В примере по локальному участку, представленному в *табл. 1*, смещение результатов в условных единицах TCI достигает 25, что соответствует четверти всей шкалы варибельности TCI [0 – 100]. На масштабе пашни области за счет усреднения внутри маски пашни максимальные смещения несколько уменьшаются, достигая 11-12 единиц TCI в погодных условиях сезона 2014 года.

Практическое использование значений TCI в схемах количественных оценок, например, линейно-регрессионных связей или в качестве одного из параметров моделирования роста и развития культуры, лучше строить на данных модифицированной шкалы TCI, которая опирается на три базовых параметра: минимум, среднее, максимум. В качественных оценках с использованием 3-5 классового деления всей температурной шкалы уточнения, вносимые модифицированной шкалой TCI, не столь значимы. Мониторинг температурного режима пахотных земель с помощью модифицированного индекса TCI в течение вегетационного сезона на базе продукта NEO LST-anomaly [Day] с 8-дневным периодом обновления предоставляет подробную информацию о динамике погодных условиях и состоянии яровых зерновых культур (см. *рис. 3*).

Радиояркая поверхностная температура является комплексным параметром, в условиях Казахстана отражающим режим увлажнения территории. Данная информация позволяет оценивать условия для развития вегетации еще до появления самой вегетации и может служить основой для различных схем диагностики и прогноза урожайности яровых зерновых культур с заблаговременностью 3 месяца и более. Это может значительно дополнить имеющиеся методы спутникового мониторинга условий развития сельскохозяйственных культур, основанные на оптических спутниковых данных через вегетационные индексы (Терехов, 2010).

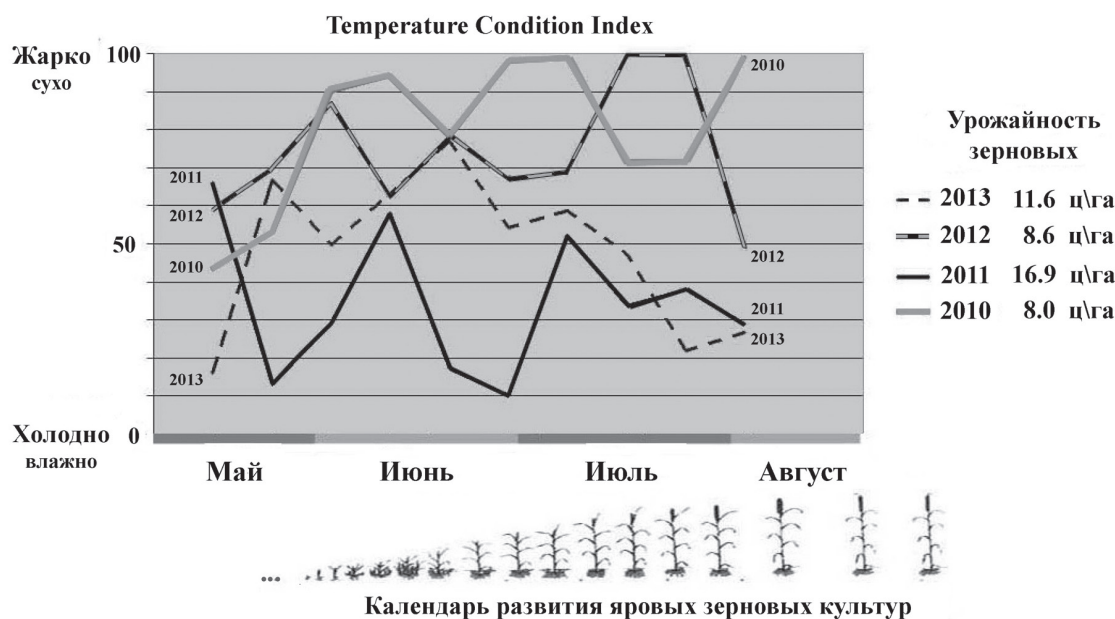


Рис. 3. Динамика поверхностной температуры пашни Казахстана (среднее по 7 областям: Акмолинская, Костанайская, Северо-Казахстанская, Павлодарская, Карагандинская, Актюбинская, Западно-Казахстанская) в сезонах 2010-2013 гг. Построено по спутниковым данным NEO LST- anomaly [Day] [<http://earthobservatory.nasa.gov>] в формате модифицированного TCI.

Выводы

Модифицированная шкала индекса температурных условий (TCI), опирающаяся не на два (Min-Max), а на три (Min-Average-Max) базовых параметра позволяет давать более устойчивые оценки в условиях асимметричных (относительно среднего) распределений значений в ряду отсчетов. Тяжелые хвосты распределений наземных температур в формате LST, когда отдельные положительные аномалии много больше отрицательных, могут являться следствием недостаточного периода накопления спутниковых данных, либо характерной особенностью погодных условий анализируемых территорий. Но в любом случае эти ситуации весьма типичны для погодных условий территории Казахстана.

Мониторинг радиояркой температуры в течение вегетационного периода с помощью продукта NEO LST-anomaly [Day] с 8-дневным периодом обновления в формате TCI с модифицированной шкалой дает хороший инструмент количественной диагностики погодных условий для пашни и состояния сельскохозяйственной вегетации для масштаба области и менее. Этот подход представляет особую ценность для территорий с климатическим недостатком увлажнения в начале вегетационного сезона, когда вегетации на пашне под яровыми культурами еще нет или ее развитие только началось.

Работа выполнена при поддержке грантов министерства образования и науки Республики Казахстан 2308/ГФ3 и 3326/ГФ4 КН МОН РК.

Литература

1. Афонин С.В. Применение физического и регрессионного подходов к измерению температуры поверхности суши по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 9-15.
2. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Сов. радио. 1966. 318 с.
3. Терехов А.Г. Эмпирические зависимости между элементами продуктивности яровой пшеницы Северного Казахстана и спектральными характеристиками полей по данным EOS MODIS в сезонах 2005-2009 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 305–314.
4. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection// Advance in Space Research. 1995. Vol. 15. No. 11. P. 91-100.
5. Lambin E.F., Ehrlich D. Combining vegetation indices and surface temperature for land-cover mapping at broad spatial scales// Int. J. Remote Sens. 1995. Vol. 16. No.3. P. 573-579.

Composite index of temperature conditions and its applicability to the description of the state of agricultural vegetation in Kazakhstan

A.G. Terekhov ¹, N.G. Makarenko ^{1,2}, I.T. Park ¹

¹*Institute of Information and Computing Technologies MES*

Almaty 050010, Kazakhstan

E-mail: aterekho1@yandex.ru

²*Central Astronomical Observatory RAS, St.-Petersburg 196140, Russian*

E-mail: ng-makar@mail.ru

In this paper, we consider a modification of the scale of the temperature condition index and verify its effectiveness for agricultural vegetation in Kazakhstan. Two classes of indices in relative scales are commonly used to describe the state of the underlying surface according to satellite monitoring data. The first one is the scale of states, which weighs the current value in the range of long-term variations. Its disadvantage is the sensitivity to large fluctuations of variations caused by rare events. The second, more popular, is scale anomalies. It shows how the current values differ from the average. The deviation from the average number reduces the nonstationarity of data, but complicates the interpretation of the indices. The proposed change to the scale adds to the basic parameters (minimum and maximum number) the arithmetic mean of the data that determines the middle of the scale. This modification is useful for data with significant kurtosis (asymmetry) in the density distribution. We present the results of comparative analysis of the proposed version of the index and the traditional ones. The data were obtained from the product NEO - Land Surface Temperature anomaly, with a resolution of 0,1 degrees and 8-day update period. Numerical experiments showed the efficiency of the modified scale for asymmetric data. We hope that this approach will improve the information basis for the diagnostics of the state of vegetation, conditions of growing and development of spring crops in Kazakhstan.

Keywords: remote sensing, brightness surface temperature, temperature condition index, the state of vegetation, moisture conditions.

References

1. Afonin S.V. Primenenie fizicheskogo i regressionnogo podkhodov k izmereniyu temperatury poverkhnosti sushi po dannym MODIS (The use of physical and regression approaches to the measurement of land surface temperature MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 9-15.
2. Zuev V.E. *Prozrachnost' atmosfery dlya vidimyykh i infrakrasnykh luchey*. (Atmospheric transparency for visible and infrared rays), Moscow: Sov. Radio, 1966, 318 p.
3. Terekhov A.G. Empiricheskie zavisimosti mezhdru elementami produktivnosti yarovoi pshenitsy Severnogo Kazakhstana i spektral'nymi kharakteristikami polei po dannym EOS MODIS v sezonakh 2005-2009. (Empirical relationships between the elements of productivity of spring wheat in Northern Kazakhstan and spectral characteristics of the fields according to EOS MODIS in the seasons 2005-2009). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 305–314.
4. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advance in Space Research*. 1995, Vol. 15, No. 11, pp. 91-100.
5. Lambin E.F., Ehrlich D. Combining vegetation indices and surface temperature for land-cover mapping at broad spatial scales. *Int. J. Remote Sens*. 1995, Vol. 16, No. 3, pp. 573-579.