

И.М. Михайленко, доктор технических наук

В.Н. Тимошин, кандидат технических наук

Агрофизический научно-исследовательский институт

РФ, 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14

В.Е. Веллер, аспирант

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

РФ, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

E-mail: ilya.mihailenko@yandex.ru

УДК 633.11«321»:631.599

DOI: 10.30850/vrsn/2021/1/4-8

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ БИОМАССЫ ПОСЕВА ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ*

В современном растениеводстве данные дистанционного зондирования Земли служат ключевой информационной технологией, так как позволяют оценить параметры состояния посевов сельскохозяйственных культур, число которых может достигать до десяти. На основании таких оценок принимаются управленческие решения, направленные на получение заданных конечных результатов. Оценить эти параметры по получившим в настоящее время широкое распространение вегетационным индексам невозможно, из-за их скалярной формы и безразмерной величины. В работе представлен классический подход к оцениванию параметров состояния посевов сельскохозяйственных культур, где данные ДЗЗ рассматриваются как косвенное измерение оцениваемых параметров. Отличие данной статьи от предыдущих работ подобной направленности заключается в том, что в качестве объекта рассматриваются сельскохозяйственные культуры с более сложной морфологической структурой, что неизбежно ведет к усложнению алгоритма оценивания. Кроме того, здесь уделено внимание такой важной особенности сельскохозяйственных объектов, как их пространственная распределенность. Для ее учета используется новый вид математических моделей, в которые введены пространственные координаты. В связи с существенным усложнением алгоритмов моделирования и оценивания на основе таких моделей, предложены более простые с точки зрения программной реализации аппроксимационные схемы. Основу таких схем составляют базовые алгоритмы, посредством которых сначала формируют оценки параметров для 20–30 элементарных участков посева, по которым выделяют пространственные вариации этих оценок и параметров отражения на используемых каналах системы ДЗЗ, а затем по данным вариациям строят параметры линейных пространственных корректоров.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, состояние посевов культур, оценивание параметров, математические модели, алгоритмы, пространственные корректоры.

I.M. Mikhaylenko, Grand PhD in Engineering sciences

V.N. Timoshin, PhD in Engineering sciences

Agrophysical Research Institute

RF, 195220, Sankt-Peterburg, Grazhdanskij prospekt, 14

V.E. Veller, PhD student

K.A. Timiryazev Russian State Agrarian University – MTAА

RF, 127550, g. Moskva, ul. Timiryazevskaya, 49

E-mail: ilya.mihailenko@yandex.ru

ASSESSMENT OF THE BIOMASS OF SPRING WHEAT SOWING

The use of Earth remote sensing data (ERS) is a key information technology in modern crop production, as it allows you to assess the parameters of the state of crops of crops, the number of which can reach up to ten. Based on such assessments, managerial decisions are made aimed at obtaining specified final results. It is impossible to assess these parameters by the currently widely used vegetation indices, due to their scalar shape and dimensionless size. The paper develops a classical approach to the problem of assessing the parameters of the state of crops of crops, in which remote sensing data are considered as an indirect measurement of the estimated parameters. The difference of this article from previous works of a similar orientation is that crops with a more complex morphological structure are considered as an object of evaluation, which inevitably leads to a complication of the estimation algorithm. In addition, such an important feature of agricultural objects as their spatial distribution is considered here. To take it into account, a new kind of mathematical models is used in which spatial coordinates are introduced. Due to the significant complication of modeling and estimation algorithms based on such models, approximation schemes that are simpler in terms of software implementation are proposed. The basis of such schemes is the basic estimation algorithms, by which first estimates are formed for 20-30 elementary sowing areas, using which spatial variations of the estimates and reflection parameters are used on the used channels of the remote sensing system, and then linear spatial corrector parameters are constructed from these variations.

Key words: remote sensing of the Earth, state of crops, estimation of parameters, mathematical models, algorithms, spatial correctors.

При использовании данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сельском хозяйстве уже стало привычным применение специальных технологий дешифрирования снимков, получае-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-016-00008) / The study was performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research (Project № 18-016-00008).

мых систематическими повторными съемками с различных аппаратов, с помощью которых обеспечивается наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур и прогнозирование урожайности. При этом, чаще всего строят различные варианты вегетационных индексов (ВИ), среди которых наибольшее распространение получил индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Используя подобные ВИ, по цветовому тону изображения полей судят об их агротехническом состоянии. [1, 2, 10, 11]

Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных участках кривой спектральной отражательной способности растений. Такой подход позволяет получать только обобщенные оценки состояния посевов. Важно заметить, что при расчете любого ВИ снижается информационный потенциал метода ДЗЗ, так как ВИ представляет собой разновидность свертки сигналов в скалярную величину, что всегда приводит к уменьшению общей информативности отдельных каналов. Для повышения эффективности данного фактора следует не уменьшать, а увеличивать число независимых каналов измерения. [5] Так, число продуктивных показателей посева, которые необходимо оценивать, может достигать 10. Оценить эти состояния по одному или нескольким скалярным ВИ невозможно и некорректно.

В работах [4-6 и др.] развивается подход, основанный на классическом оценивании параметров состояния посевов сельскохозяйственных культур по данным ДЗЗ, рассматриваемым как косвенное измерение состояния объекта. Этот подход апробирован на различных кормовых культурах, биомассу которых используют для приготовления кормов.

Цель работы – развитие классического подхода к оцениванию параметров состояния посевов более сложных по своей морфологической структуре зерновых культур.

Постановка задачи

Оценивание параметров состояния биомассы посева яровой пшеницы заключается в построении в реальном времени оценок таких физических параметров, как плотность общей биомассы и ее товарной части (урожайность), а также ее состав по сухой и сырой массе. Оценки этих параметров будут использоваться для решения задач управления агротехнологиями. Классический подход к оцениванию заключается в уточнении априорной информации о параметрах состояния посевов по апостериорной информации, в нашем случае – данным ДЗЗ.

Вся априорная информация об оцениваемых параметрах содержится в математических моделях, отражающих их зависимость от основных влияющих факторов. В связи с тем, что посев яровой пшеницы может характеризоваться двумя различными структурами биомассы – до колошения и после его наступления, в задаче оценивания используются две математические модели. [5, 8] Развернутая форма модели параметров биомассы яровой пшеницы до колошения имеет следующий вид [8]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{1m}^{\&}(y, h) \\ x_{2m}^{\&}(y, h) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} x(t)_{1m}(y, h) \\ x(t)_{2m}(y, h) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} v_N(t, y, h) \\ v_K(t, y, h) \\ v_P(t, y, h) \\ v_{Mg}(t, y, h) \\ v_5(t, y, h) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}, \quad (1) \\ &t \in (T_{1m}, T_{2m}), x_{1m}(T_{1m}) = 0, x_{2m}(T_{2m}) = 0; \end{aligned}$$

где x_{1m} и x_{2m} – средняя по площади поля плотность биомассы (урожай) и сырой массы посева, ц га⁻¹; внешние возмущения в обоих блоках: f_1, f_2, f_3 – среднесуточные показатели – соответственно температуры воздушной среды, °С; уровня радиации, Вт (м² ч)⁻¹; –интенсивности осадков, мм; v_N, v_K, v_P, v_{Mg} – содержание в почве (кг га⁻¹): азота, калия, фосфора магния; v_4 – влагозапас, мм; y, h – пространственные координаты, м.

Каноническая векторно-матричная символьная форма модели (1):

$$\begin{aligned} X_m^{\&}(y, h) &= A_m X_m(t, y, h) + B_m V(t, y, h) + C_m F(t), \\ &t \in (T_{1m}, T_{2m}), X_m(T_{1m}, y, h) = 0. \quad (2) \end{aligned}$$

Развернутая форма модели параметров биомассы яровой пшеницы с начала колошения:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{1u}^{\&}(y, h) \\ x_{2u}^{\&}(y, h) \\ x_{3u}^{\&}(y, h) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_u \begin{bmatrix} x_{1u}(t, y, h) \\ x_{2u}(t, y, h) \\ x_{3u}(t, y, h) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \end{bmatrix}_u \begin{bmatrix} v_N(t, y, h) \\ v_K(t, y, h) \\ v_P(t, y, h) \\ v_{Mg}(t, y, h) \\ v_5(t, y, h) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}_u \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &t \in (T_{1u}, T_{2u}), x_{1u}(T_{1u}, y, h) = x_{1u0}(y, h), x_{2u}(T_{1u}, y, h) = x_{2u0}(y, h), \\ &x_{3u}(T_{1u}, y, h) = x_{3u0}(y, h); \end{aligned}$$

где x_{1u}, x_{2u}, x_{3u} – средние по площади показатели, ц га⁻¹: плотности биомассы посева (биологический урожай), сырой массы посева, массы колосьев посева (урожай).

Каноническая векторно-матричная символьная форма модели (3):

$$\begin{aligned} X_u^{\&}(y, h) &= A_u X_u(t, y, h) + B_u V(t, y, h) + C_u F(t), \\ &t \in (T_{1u}, T_{2u}), X_u(T_{1u}, y, h) = X_{u0}(y, h). \quad (4) \end{aligned}$$

Информация о параметрах состояния биомассы посева, формируемая моделями (2), (4), должна корректироваться по реальным измерениям, для чего вводятся модели ДЗЗ.

Модель оптических измерений (Д33) состояния биомассы посева яровой пшеницы на период до начала колошения в векторно-матричной символьной форме:

$$Z_m^T(y, h) = P_m W(X_m(y, h)). \quad (5)$$

где: $Z_m^T(y, h) = [z_{1m}(y, h) \ z_{2m}(y, h)]$ – вектор параметров отражения для пространственной координаты (y, h) видимом диапазоне (400...700 нм) (z_1) и в ближнем инфракрасном диапазоне (750–950 нм) (z_2); P – матрица параметров модели.

$W(X_m(y, h)) = [1x_{1m}(y, h)x_{2m}(y, h)x_{1m}^2(y, h)x_{2m}^2(y, h)x_{1m}^3(y, h)x_{2m}^3(y, h)]$ – вектор-функция, в котором параметры состояния посева: x_{1m}, x_{2m} – плотность посева для пространственной координаты (y, h) ц га⁻¹ – биомассы (биологический урожай), сырой массы.

Модель оптических измерений (модель Д33) состояния биомассы посева яровой пшеницы от начала колошения до созревания урожая в векторно-матричной символьной форме:

$$Z_u(y, h) = P_u W(X_u(y, h)) \quad (6)$$

где: $Z_u^T(y, h) [z_{1u}(y, h) \ z_{2u}(y, h) \ z_{3u}(y, h)]$ – вектор интегрированных параметров отражения в зеленом (500...565 нм), красном (625...740 нм), ближнем ИК (750...950 нм) (z_{1m}, z_{2m}, z_{3m} соответственно).

Вектор – функция:

$$W(X_u(y, h)) = [1 \ x_{1u}(y, h) \ x_{2u}(y, h) \ x_{3u}(y, h) \ x_{1u}^2(y, h) \ x_{2u}^2(y, h) \ x_{3u}^2(y, h) \ x_{1u}^3(y, h) \ x_{2u}^3(y, h) \ x_{3u}^3(y, h)] \quad (7)$$

где аргументами являются параметры состояния посева для пространственной координаты (y, h) : x_{1u}, x_{2u}, x_{3u} – плотность (ц га⁻¹) биомассы посева; сырой массы; массы колосьев соответственно.

Главная особенность векторно-матричных математических моделей заключается в том, что здесь компоненты векторов представлены не скалярными величинами, а двумерными распределениями соответствующих параметров биомассы в динамических моделях состояния и параметров отражения в моделях Д33. Такой подход значительно усложняет алгоритмы моделирования и оценивания, и приводит к необходимости ввода пространственных циклов, где число переменных зависит от способа разбивки общей поверхности поля на элементарные участки. Так, при площади элементарного участка 2 м², число циклических переменных составит 5000 на 1 га, при общей посевной площади поля под посевом 500 га, общее число элементарных участков и циклов алгоритма – 2,5 10⁶ ед. Поэтому, при больших площадях посевов (более 1000 га) целесообразно использовать аппроксимационные схемы моделирования и оценивания. Суть таких схем заключается в том, что сначала моделируются и оцениваются средние по площади поля параметры состояния посева, которые затем корректируются по поверхности поля посредством корректирующей модели одинаково для состояния посева до и после колошения (опуская индексы фенологического состояния посева)

$$\begin{aligned} X(t, y, h) &= X(t) + \Delta X(y, h), \\ \Delta X(y, h) &= K \Delta Z(y, h), \end{aligned} \quad (8)$$

где: K – матрицы пространственного корректора для моделей (2), (4), параметры которых оцениваются путем формирования массива вариаций параметров отражения Д33 $\Delta Z(y, h)$ и оценок параметров биомассы $\Delta X(y, h)$ по 30...40 элементарным участкам.

Для формирования оценок параметров биомассы $X(t, y, h)$ на выбранных элементарных участках используется следующий алгоритм локального оценивания, построенный на основе моделей (2), (4). [5, 6]:

$$\begin{aligned} \hat{X}(t, y, h) &= AX(t, y, h) + BV(t, y, h) + CF(t) + \\ &+ R(t, y, h)P \frac{\partial W^T(X)}{\partial X} K_z^{-1} (Z(t, y, h) - X(t, y, h)), \\ \hat{R}(t, y, h) &= R(t, y, h)A^T + AR(t, y, h) - \\ &- R(t, y, h)P_i \frac{\partial W^T(X)}{\partial X} K_z^{-1} \frac{\partial W(X)}{\partial X} P^T R(t, y, h), \end{aligned} \quad (9)$$

где: $R(t, y, h)$ – матрицы ошибок оценивания, имеющие размерность, соответствующую векторам параметров биомассы моделей (2), (4).

Апробация алгоритмов оценивания

Апробацию алгоритмов оценивания проводили на опытном полигоне Меньковского филиала Агрофизического института. Площадь поля была разбита на 82 элементарных участка, обозначенных номерами. С десяти таких участков отбирали пробы биомассы посева и почвы в течение всего вегетационного периода. В образцах методом лабораторного анализа выявляли физические и химические параметры. Одновременно выполняли приземное дистанционное зондирование ручным гиперспектрометром HandHeld 2 Portable Spectroradiometer (производитель ASD Inc., США). На основании мониторинговой информации идентифицировали все используемые в алгоритме оценивания математические модели. В интервале времени, предшествующему колошению, фиксировали параметры отражения в видимом и ближнем ИК оптических диапазонах (рис. 1). Ошибки оценивания по обоим параметрам соответствуют 10%-у полю допуска. Для интервала вегетации от начала колошения до созревания зерна фиксировали параметры отраже-

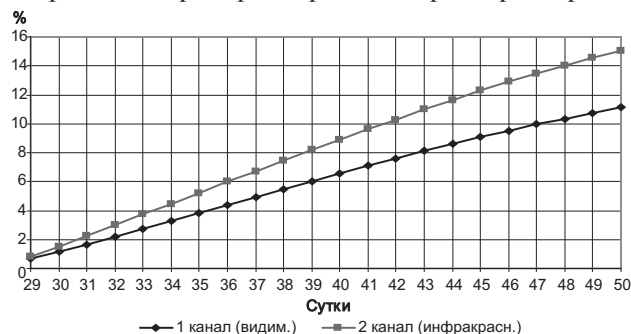


Рис. 1. Динамика средних по площади поля параметров отражения посева яровой пшеницы в интервале времени, предшествующем колошению.

ния в зеленом, красном и ближнем ИК диапазонах оптического спектра, а в составе биомассы оценивали массу колосьев (урожай). Эти структурные изменения не отразились на точности оценивания (рис. 2).

Такую же процедуру оценивания применяли на 30 элементарных участках, по результатам которой была сформирована БД, включающая в себя два сег-

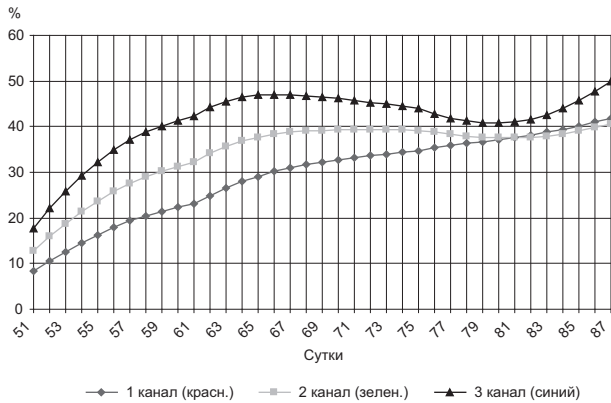


Рис. 2. Динамика параметров отражения посева яровой пшеницы в интервале времени от колошения до созревания зерна.

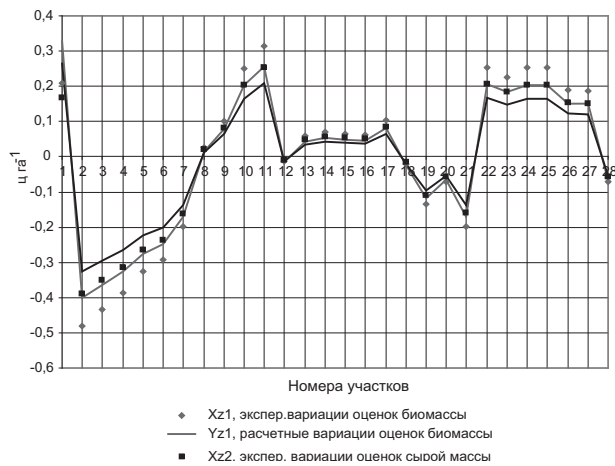


Рис. 3. Настройка пространственного корректора оценок биомассы посева яровой пшеницы в интервале времени, предшествующем колошению.

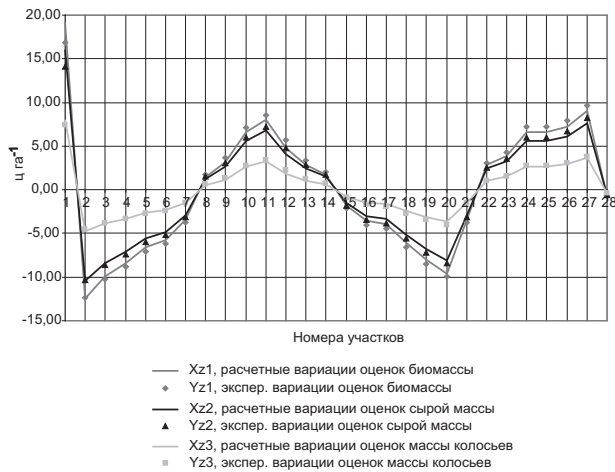


Рис. 4. Настройка пространственного корректора оценок биомассы посева яровой пшеницы в интервале времени от колошения до созревания зерна.

мента, до начала колошения и от начала колошения до фазы созревания зерна в колосе. Полученная БД служит информационной основой для настройки пространственных корректоров оценок. Как видно из графиков настройки пространственных корректоров, точность настройки достаточно высокая (в пределах 5%-го интервала), что обеспечивает достаточно надежную пространственную коррекцию оценок параметров биомассы (рис. 3, 4). Такие оценки построены для 70-х суток вегетационного периода, когда был сделан облет опытного поля и получены данные ДЗЗ в используемых оптических диапазонах.

Выводы. Предложена новая методика и алгоритм оценивания параметров биомассы посева зерновых культур по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), развивающие классический подход к проблеме оценивания, основанный на использовании математических моделей оцениваемых параметров и их связи с данными ДЗЗ. Основное отличие предложенной методики заключается в переходе к моделям с пространственными переменными и учете фенологических фаз посева зерновых. Для упрощения вычислительных процедур, связанных с наличием пространственных переменных, предложен аппроксимационный подход, основанный на использовании линейных пространственных корректоров, число которых равно числу структур математических моделей параметров состояния биомассы посева. Построение пространственных корректоров осуществляется путем многократного решения задачи оценивания на отдельных элементарных участках и выделения пространственных вариаций данных ДЗЗ и оценок, по которым настраивают параметры пространственных корректоров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Антонов, В.Н. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ / В.Н. Антонов, Л.А. Сладких // Геоматика. – 2009. – № 4. – С. 50–53.
2. Барталев, С.А. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS / С.А. Барталев, Е.А. Лупян, И.А. Нейштадт, И.Ю. Савин // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 3. – С. 68–75.
3. Марчуков, В.С. Теория и методы тематической обработки аэрокосмических изображений на основе многоуровневой сегментации / В.С. Марчуков. – М.: Геодезия и Картография. – 2011. – С. 27.
4. Михайленко, И.М. Оценивание химического состояния почвенной среды по данным дистанционного зондирования Земли. / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 125–134.
5. Михайленко, И.М. Математическое моделирование и оценивание химического состояния почвенной среды по данным дистанционного зондирования Земли / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2018. – № 9. – Ч. 2. – С. 26–38.
6. Михайленко, И.М. Принятие решений о дате заготовки кормов на основе данных дистанционного зондирования Земли и подстраиваемых математических моделей / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин // Со-

- временные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 164–175.
7. Михайленко, И.М. Управление сроками сева по данным дистанционного зондирования Земли /И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 5. – С. 178–189.
 8. Михайленко, И.М. Дистанционное зондирование Земли в сельскохозяйственной науке и практике / И.М. Михайленко, В.П. Якушев// Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2016. – № 4. – С. 21–25.
 9. Mikhailenko, I.M. Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data / I.M. Mikhailenko // International Journal of Information Technology & Operations Management – Vol. 1. – № 5 – August 2013. – P. 41–51.
 10. Ponzoni, F.J. Local Illumination Influence on Vegetation Indices and Plant Area Index (PAI) Relationships *Remote Sens* / F.J. Ponzoni, Borges da Silva C., Benfica dos Santos S., O.C. Montanher, Batista dos Santos T.– 2014. – 6(7) – 6266–6282; doi:10.3390/rs6076266Article.
 11. Sims, D.A. Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages / D.A. Sims, J.A. Gamon // Remote Sensing of Environment. – 2002. – P. 337–354.
 4. Mihajlenko, I.M. Ocenivanie himicheskogo sostoyaniya pochvennoj sredy po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli. / I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 125–134.
 5. Mihajlenko, I.M. Matematicheskoe modelirovanie i ocenivanie himicheskogo sostoyaniya pochvennoj sredy po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli /I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin// Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2018. – № 9. – Ch. 2. – С. 26–38.
 6. Mihajlenko, I.M. Prinyatie reshenij o date zagotovki kormov na osnove dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli i podstraivaemyh matematicheskikh modelej / I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin// Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 164–175.
 7. Mihajlenko, I.M. Upravlenie srokami seva po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli /I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin// Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2017. – Т. 14. – № 5. – С. 178–189.
 8. Mihajlenko, I.M. Distancionnoe zondirovanie Zemli v sel'skohozyajstvennoj nauke i praktike /I.M. Mihajlenko, V.P. YAKushev// Vestnik rossijskoi sel'skohozyajstvennoj nauki. – 2016. – № 4. – С. 21–25.
 9. Mikhailenko, I.M. Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data / I.M. Mikhailenko // International Journal of Information Technology & Operations Management – Vol. 1. – № 5. – August 2013. – P. 41–51.
 10. Ponzoni, F.J. Local Illumination Influence on Vegetation Indices and Plant Area Index (PAI) Relationships *Remote Sens* / F.J. Ponzoni, Borges da Silva C., Benfica dos Santos S., O.C. Montanher, Batista dos Santos T. – 2014. – 6(7) – 6266–6282; doi:10.3390/rs6076266Article.
 11. Sims, D.A. Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages / D.A. Sims, J.A. Gamon // Remote Sensing of Environment. – 2002. – P. 337–354.

LIST OF SOURCES

1. Antonov, V.N. Monitoring sostoyaniya posevov i prognozirovanie urozhajnosti yarovoj pshenicy po dannym DZZ / V.N. Antonov, L.A. Sladkih // Geomatika. – 2009. – № 4. – С. 50–53.
2. Bartalev, S.A. Klassifikaciya nekotoryh tipov sel'skohozyajstvennyh posevov v yuzhnyh regionah Rossii po sputnikovym dannym MODIS /S.A. Bartalev, E.A. Lupyan, I.A. Nejshtadt, I.YU. Savin // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2006. – № 3. – С. 68–75.
3. Marchukov, V.S. Teoriya i metody tematicheskoj obrabotki aerokosmicheskikh izobrazhenij na osnove mnogourovnevnoj segmentacii/ V.S. Marchukov. – М.: Geodeziya i Kartografiya. – 2011. – С. 27.
4. Mihajlenko, I.M. Ocenivanie himicheskogo sostoyaniya pochvennoj sredy po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli. / I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 125–134.
5. Mihajlenko, I.M. Matematicheskoe modelirovanie i ocenivanie himicheskogo sostoyaniya pochvennoj sredy po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli /I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin// Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. – 2018. – № 9. – Ch. 2. – С. 26–38.
6. Mihajlenko, I.M. Prinyatie reshenij o date zagotovki kormov na osnove dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli i podstraivaemyh matematicheskikh modelej / I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin// Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2018. – Т. 15. – № 1. – С. 164–175.
7. Mihajlenko, I.M. Upravlenie srokami seva po dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli /I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin// Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2017. – Т. 14. – № 5. – С. 178–189.
8. Mihajlenko, I.M. Distancionnoe zondirovanie Zemli v sel'skohozyajstvennoj nauke i praktike /I.M. Mihajlenko, V.P. YAKushev// Vestnik rossijskoi sel'skohozyajstvennoj nauki. – 2016. – № 4. – С. 21–25.
9. Mikhailenko, I.M. Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data / I.M. Mikhailenko // International Journal of Information Technology & Operations Management – Vol. 1. – № 5. – August 2013. – P. 41–51.
10. Ponzoni, F.J. Local Illumination Influence on Vegetation Indices and Plant Area Index (PAI) Relationships *Remote Sens* / F.J. Ponzoni, Borges da Silva C., Benfica dos Santos S., O.C. Montanher, Batista dos Santos T. – 2014. – 6(7) – 6266–6282; doi:10.3390/rs6076266Article.
11. Sims, D.A. Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages / D.A. Sims, J.A. Gamon // Remote Sensing of Environment. – 2002. – P. 337–354.