

Оценивание параметров состояния биомассы корнеплодных культур по данным дистанционного зондирования Земли

И. М. Михайленко, В. Н. Тимошин

*Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: ilya.mihailenko@yandex.ru, v.timoshin@yandex.ru*

Рассматривается проблема оценивания параметров биомассы корнеплодных культур по данным дистанционного зондирования Земли. У культур подобного типа подземная часть биомассы недоступна средствам оптического дистанционного зондирования. Для решения данной проблемы необходимо использование трёх математических моделей: модели динамики параметров биомассы корнеплодной культуры, отражающей взаимосвязь наземной части биомассы с массой корнеплодов; модели параметров почвенной среды, демонстрирующей вынос биомассой корнеплодной культуры питательных элементов и влаги; а также модели оптического дистанционного зондирования, показывающей взаимосвязь параметров отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах с параметрами наземной части биомассы. В связи с тем, что подземная часть культуры недоступна средствам дистанционного зондирования Земли, то к модели динамики параметров биомассы корнеплодной культуры предъявляются особые требования. Она должна обладать свойством наблюдаемости, которое обеспечивает восстановление всех компонентов биомассы и при её исследовании по данным дистанционного зондирования Земли. Наличие этих моделей позволяет одновременно получать параметры биомассы корнеплодной культуры и параметры почвенной среды с замыканием алгоритма оценивания на реальные данные дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, корнеплодные культуры, параметры биомассы, математические модели, алгоритм оценивания

Одобрена к печати: 19.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-161-170

Введение

Сельское хозяйство — одно из самых востребованных направлений использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Антонов, Сладких, 2009; Барталев и др., 2006). На основании этой информации появляется возможность строить современные эффективные системы мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий, создавать автоматизированные системы управления агротехнологиями и по-новому решать многие научно-исследовательские задачи. Посредством эффективных систем мониторинга возможно решение таких важнейших народнохозяйственных задач, как прогнозирование конечного результата (урожая) сельскохозяйственных культур, обнаружение чрезвычайных ситуаций на полях, оценивание плодородия и степени деградации почв, учёт, инвентаризация и классификация сельскохозяйственных угодий с одновременным формированием специальных крупномасштабных планов и карт. Всё это позволяет реализовать эффективную поддержку управляющих решений в сельском хозяйстве (Михайленко, 2011).

В большой обзорной работе (Sami et al., 2020) проведён анализ литературы в период с 2000 по 2019 г., ориентированный на применение технологий ДЗЗ в сельском хозяйстве на всех его технологических стадиях, начиная от подготовки полей, посадки и периода вегетации до сбора урожая. Этот обзор выполнен с целью содействия научному пониманию потенциала технологий ДЗЗ. Здесь показано, что большинство предыдущих исследований в области ДЗЗ были сосредоточены на мониторинге влажности почвы и сезонных болезней сельскохозяйственных культур. В результате анализа установлено, что технологии ДЗЗ могут быть использованы для поддержки конкретных управленческих решений на различных этапах производства, помогая оптимизировать растениеводство при одновременном решении вопросов качества окружающей среды, рентабельности и устойчивости.

Однако авторы не предоставили подробную информацию о методах, используемых в предыдущих исследованиях, и не дали рекомендаций по способам наилучшего применения данных ДЗЗ. Основное внимание было сосредоточено на типах и платформах датчиков ДЗЗ, задействуемых в различных аспектах производственного сельского хозяйства, и точности данных ДЗЗ в отношении наземных измерений. Авторы делают выводы о том, что технологии дистанционного зондирования развивались на протяжении многих лет и современный сельскохозяйственный сектор располагает множеством вариантов с точки зрения платформ (спутник, пилотируемый самолёт, беспилотный летательный аппарат) и датчиков (например, видимых, мультиспектральных, гиперспектральных, тепловых) для сбора различных сельскохозяйственных данных. При наличии таких датчиков и платформ сельскохозяйственному сообществу важно лучше понимать возможности и ограничения каждой технологии, с тем чтобы обеспечить получение ценной информации на основе данных при одновременном сведении к минимуму затрат и преодоления технических трудностей, связанных со сбором и использованием данных.

Особое внимание уделено возможности оценивания урожайности сельскохозяйственных культур по данным ДЗЗ. Указано, что для этих целей кроме данных ДЗЗ предполагается введение в рассмотрение других вспомогательных переменных, таких как погода (например, солнечная радиация, температура, осадки), условия вегетации и свойства почвы, с помощью эмпирического или механистического подходов. Поскольку эмпирические подходы непосредственно связывают входные данные с выходными посредством чисто статистических средств, они являются относительно простыми, и для повышения надёжности модели существует необходимость в большем объёме данных.

Особенно важно указание авторов на то, что традиционные подходы к определению сезонных стрессов сельскохозяйственных культур опираются на полевое обследование сельскохозяйственных культур или лабораторные эксперименты, которые являются трудоёмкими и дорогостоящими, если их распространить на большие площади. Использование ДЗЗ обеспечивает своевременный и неразрушающий подход к выявлению, количественной оценке и картографированию стрессов, связанных с сельскохозяйственными культурами, и, таким образом, полезно для руководства конкретными управленческими решениями по применению питательных веществ.

Авторы установили, что для улучшения прогнозирования урожайности в предыдущих исследованиях была предложена идея ассимиляции данных ДЗЗ в механистическую модель роста сельскохозяйственных культур, основанную на сезонных прогнозах погоды и практике управления полевыми хозяйствами. Такая идея существует уже давно, однако она всё ещё недостаточно изучена. Авторы утверждают, что возросшая доступность к большему количеству данных ДЗЗ и развитие современных средств анализа данных продвинуло исследования в этом направлении.

Несмотря на очень большой объём анализируемых источников, авторы не затронули научно-методических основ проблемы оценивания параметров состояния посевов сельскохозяйственных культур на основе данных ДЗЗ. В то же время можно утверждать, что эта работа является прологом к решению такой проблемы.

Настоящая работа направлена на её решение, и развиваемый в ней подход уже рассматривался в предыдущих работах (Михайленко, 2011; Михайленко, Тимошин, 2017, 2018а, б; Михайленко, Якушев, 2016; Михайленко и др., 2018; Strippen, 1990; Gamon et al., 1997; Mikhailenko, 2013; Ponzoni et al., 2014; Sims, Gamon, 2002). Он основан на классическом оценивании параметров состояния посевов сельскохозяйственных культур по данным ДЗЗ, рассматриваемым как косвенное измерение состояния объекта оценивания (Михайленко, 2011). Этот подход был апробирован на зерновых и кормовых культурах. Большая часть биомассы этих культур формируется над поверхностью поля и доступна средствам ДЗЗ. Ситуация меняется коренным образом при оценивании параметров состояния корнеплодных культур, товарная часть биомассы которых формируется в почве и недоступна средствам ДЗЗ. В то же время наличие такой информации необходимо для управления технологиями, ориентированными на существенное повышение урожайности этих культур.

Проблема оценивания параметров биомассы корнеплодных культур может решаться по двум существенно различающимся направлениям. Первое из них подразумевает определённое изменение технической базы ДЗЗ за счёт привлечения средств радиолокационного зондирования. Они позволяют оценивать параметры физического состояния почвенной среды и на их основе ставить и решать задачу оценивания параметров корнеплодной биомассы. Трудности реализации этого направления связаны со слабым развитием радиолокационных средств зондирования на спутниковой и авиационной платформах. Проявляется также недостаточная изученность результатов радиолокационного зондирования почв с корнеплодными культурами. Второе направление связано с дальнейшим развитием методологии классического оценивания состояния биомассы и почвенной среды, в которых ведущую роль играют математические модели. Именно такой подход и рассматривается в настоящей работе, где решается задача оценивания параметров биомассы сахарной свёклы.

Математические модели объекта оценивания

При выборе математической модели динамики биомассы корнеплодных культур следует иметь в виду следующие особенности.

Рост листьев и корнеплода тесно взаимосвязаны, но динамика (ход) нарастания этих компонентов биомассы в течение вегетации неодинакова. Так, во второй половине периода вегетации темпы роста ботвы могут заметно отставать от темпов роста корнеплодов. В начале вегетации наблюдается интенсивный рост листового аппарата и питающей корневой системы. Позднее, в июле – августе, интенсивнее растут корнеплоды.

В этой связи в начале вегетации масса листьев в несколько раз больше, а к концу вегетации, наоборот, масса корнеплодов превышает массу ботвы. К уборке листья составляют 1/3–1/2 урожая корнеплодов.

Установлено, что чем больше листовой поверхности приходится на единицу массы корнеплода в начале вегетации, тем выше у такого растения масса корнеплода ко времени уборки, т. е. выше урожайность. Поэтому необходимо делать всё, чтобы растения в течение всей вегетации имели оптимальную, но не чрезмерно развитую ботву. Масса листьев достигает своего максимума обычно к августу и в дальнейшем постепенно уменьшается, тогда как нарастание корнеплода и накопление в нём сахара идут непрерывно до самой уборки.

На *рис. 1* представлен процесс роста растений сахарной свёклы, где фазы развития отличаются только числом (густотой) листьев, т. е. плотностью наземной биомассы.

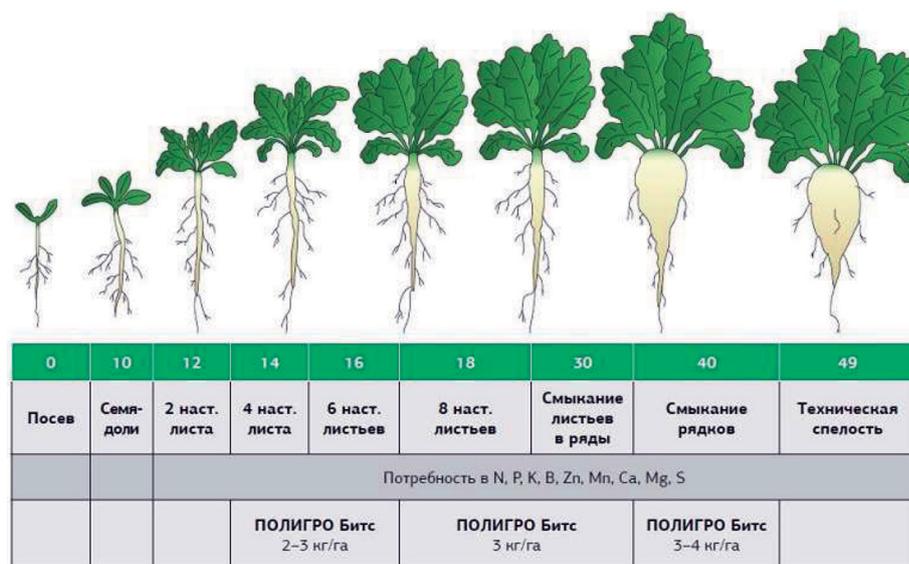


Рис. 1. Фенофазы развития сахарной свёклы

Плотности наземной биомассы всегда соответствует определённая биомасса корнеплодов. Модель должна учитывать влияние всех основных факторов роста и развития, к которым относятся элементы питания и внешние метеофакторы, а также особенности вегетации, приведённые выше. Среди всех возможных параметров состояния биомассы корнеплодных культур мы выделяем общую и сырую биомассу наземной части и массу корнеплодов. В этом случае модель динамики этих параметров может быть представлена в развёрнутой форме:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t-t_0 \\ (t-t_0)^2 \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \\ \xi_3(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

или в символической векторно-матричной форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= AX(t) + Bd(t) + DV(t) - K\varphi(t-t_0) + CF(t) + Z(t), \\ t &\in (0, T), \quad X(0) = X_0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где t — время вегетации, сут; x_1, x_2, x_3 — среднее по площади поля значение соответственно общей биомассы листьев (ботвы) культуры, сырой наземной биомассы листьев (ботвы) культуры, общей биомассы корнеплодов культуры, ц/га; d_N, d_K, d_P — средние по площади поля дозы некорневого внесения соответственно азотных, калийных и фосфорных удобрений, кг/га; v_N, v_K, v_P — среднее по площади поля содержание действующего вещества соответственно азота, калия и фосфора в почве, кг/га; v_4 — среднее по площади поля содержание влаги в почве, мм; $\varphi(t-t_0)$ — вектор, компонентами которого являются линейная и квадратичная функция времени вегетации, посредством которых учитывается неодинаковый темп нарастания массы ботвы и корнеплодов; t_0 — момент времени вегетации, с которого биомасса ботвы и корнеплодов нарастает с разной скоростью; f_1 — среднесуточная температура воздуха, °C; f_2 — среднесуточное значение солнечной радиации, Вт·м⁻²; f_3 — среднесуточный уровень интенсивности осадков, мм; ξ_1, ξ_2, ξ_3 — случайные ошибки моделирования, учитывающие ненаблюдаемые и неучтённые факторы, представляющие собой случайные процессы с нулевыми средними и дисперсиями $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_3^2$; $a_{11}...a_{33}$ — параметры динамической матрицы модели (1), (2); $b_{11}...b_{23}$ — параметры матрицы передачи управления модели (1), (2); $d_{31}...d_{34}$ — параметры матрицы взаимосвязи параметров состояния биомассы культуры и параметров почвы; k_1, k_2 — параметры матрицы влияния времени на параметры биомассы свёклы; $c_{11}...c_{33}$ — параметры матрицы передачи климатических возмущений модели (1), (2).

Модель (1), (2) представляет собой основной блок параметров состояния корнеплодной культуры. Кроме этого блока необходимо введение в рассмотрение модели параметров состояния почвенной среды. Развёрнутая форма этой модели имеет следующий вид (Михайленко, Тимошин, 2018а, б):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_K \\ \dot{v}_P \\ \dot{v}_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_N(t) \\ D_K(t) \\ D_P(t) \\ D_4(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} \\ m_{21} & 0 & m_{23} \\ m_{31} & 0 & m_{33} \\ 0 & m_{42} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $a_{11} \dots a_{44}$ — параметры динамической матрицы модели (3); $c_{11} \dots c_{43}$ — параметры матрицы передачи климатических возмущений модели (3); $m_{11} \dots m_{42}$ — параметры матрицы взаимосвязи параметров состояния почвенной среды и параметров биомассы свеклы (параметры выноса элементов питания); D_N, D_K, D_P — дозы внесения соответственно азота, калия, фосфора, кг/га; D_4 — нормы поливов, мм.

Модель (3) в компактной символьной форме:

$$\dot{V} = A_V V(t) + B_V D_V(t) + C_V F(t) - M X(t). \quad (4)$$

Оценивание параметров биомассы свёклы

Оценивание параметров биомассы культуры предполагает сопоставление оцениваемых и реально наблюдаемых параметров. При применении данных ДЗЗ наблюдаются параметры отражения в используемых диапазонах технических средств зондирования. Такое сопоставление возможно только при введении модели ДЗЗ. Физическую основу таких моделей представляют законы отражения от почвенно-растительного покрова, имеющие экспоненциальную форму (Кочубей и др., 1990; Рачулик, Ситникова, 1981). При разложении экспоненциальных компонент в степенные ряды такая модель имеет следующий вид (Михайленко, 2011; Михайленко, Якушев, 2016):

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{01} & p_{11}x_1 & p_{12}x_2 & p_{13}x_1^2 & p_{14}x_2^2 & p_{15}x_1^3 & p_{16}x_2^3 \\ p_{02} & p_{21}x_1 & p_{22}x_2 & p_{23}x_1^2 & p_{24}x_2^2 & p_{25}x_1^3 & p_{26}x_2^3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

или в векторно-матричной символьной форме:

$$Z(P, X) = P W(X) + \xi, \quad (6)$$

где $Z^T = [z_1 \ z_2]$ — вектор параметров отражения для пространственной координаты в видимом диапазоне (400–700 нм) (z_1) и в ближнем инфракрасном диапазоне (750–950 нм) (z_2);

$P = \begin{bmatrix} p_{01} & p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{02} & p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \end{bmatrix}$ — матрица параметров модели:

$W(X) = [1 \ x_1(y, h) \ x_2(y, h) \ x_1^2(y, h) \ x_2^2(y, h) \ x_1^3(y, h) \ x_2^3(y, h)]$ — вектор-функция, где аргументами являются параметры состояния посева: $\xi^T = [\xi_1 \ \xi_2]$ — вектор ошибок моделирования ДЗЗ с нулевым средним и матрицей ковариаций K_z .

Наличие модели ДЗЗ (4), (5) позволяет формировать оценки параметров отражения в используемых спектральных диапазонах, сравнивать их с реальными данными ДЗЗ и на основании такого сравнения получать оценки параметров биомассы в реальном времени. Такая процедура восстановления полного вектора параметров состояния биомассы (наземной и подземной части) по наблюдениям данных ДЗЗ возможна только для системы, включающей в себя модели (2), (4), обладающей свойствами наблюдаемости (Казаков, 1987).

Это свойство определяется структурой моделей (2), (4). Введём в рассмотрение переходную матрицу для модели (2)

$$\dot{\Phi}(t) = A \Phi(t), \quad t \in (0, t), \quad \Phi(0) = E, \quad (7)$$

где E — единичная матрица.

Условие наблюдаемости системы (2), (4) имеет следующий вид:

$$\det \left[\int_0^{\tau} \Phi^T \left(\frac{\partial Z(P, X)}{\partial X} \right)^T \left(\frac{\partial Z(P, X)}{\partial X} \right) dt \right] \neq 0, \quad (8)$$

где $\det[\dots]$ — определитель матрицы.

Отсутствие нулевых членов в матрицах A и $\frac{\partial Z(P, X)}{\partial X}$ указывает на то, что определитель матрицы (8) отличен от нуля, т. е. матрица неособенная.

Как показано в работах (Михайленко, 2011; Михайленко и др., 2018) классическая теория оценивания параметров состояния биомассы сельскохозяйственных культур основана на комплексировании априорной информации, формируемой математической моделью динамики биомассы и апостериорной информации, содержащейся в данных ДЗЗ.

В этом случае процедура оценивания для системы (2), (6) имеет следующий вид (Михайленко, 2011; Казаков, 1987):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{X}}(t) &= A \hat{X}(t) + D \hat{V}(t) + CF(t) + R(t) \frac{\partial W^T(P, \hat{X})}{\partial \hat{X}} K_z^{-1} [Z(t) - W^T(P, \hat{X})], \\ \dot{R}(t) &= R(t) A^T + AR(t) - R(t) \frac{\partial W^T(P, \hat{X})}{\partial \hat{X}} K_z^{-1} \frac{\partial W(P, \hat{X})}{\partial \hat{X}} P^T R(t), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $R(t, y, h)$ — матрицы ошибок оценивания, имеющие размерность, соответствующую векторам параметров биомассы модели (2).

Реализация алгоритма оценивания (9) сталкивается с проблемой оценивания вектора параметров состояния почвенной среды, являющегося важной компонентой алгоритма. В связи с тем, что параметры состояния почвенной среды в свою очередь зависят от параметров состояния посева за счёт выноса элементов питания и влаги, то такое связанное оценивание может быть реализовано по следующей вычислительной схеме:

Шаг 0. Задаётся начальное значение вектора параметров состояния почвенной среды, постоянное для всего рассматриваемого межфазного периода V_0 , $t \in (T_{j-1}, T_j)$, а также циклическая переменная $i = 0$.

Шаг 1. Решается система (8) алгоритма оценивания, формируется промежуточная оценка вектора параметров состояния посева $\hat{X}_i(t)$.

Шаг 2. Вычисляется текущее значение критерия эффективности общей процедуры оценивания $I_i = \int_{T_{j-1}}^{T_j} (Z(t) - H\hat{X}_i(t))^T (Z(t) - H\hat{X}_i(t))$, где $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ — матрица выхода.

Шаг 3. Текущая оценка вектора параметров состояния посева $\hat{X}_i(t)$ подставляется в модель (3) и формируется текущая оценка вектора параметров состояния почвенной среды $V_i(t)$.

Шаг 4. Текущая оценка вектора параметров состояния почвенной среды $V_i(t)$ подставляется в алгоритм оценивания (8) и формируется промежуточная оценка вектора параметров состояния посева для следующей итерации $\hat{X}_{i+1}(t)$.

Шаг 5. Вычисляется текущее значение критерия эффективности общей процедуры оценивания для итерации $i+1$:

$$I_{i+1} = \int_{T_{j-1}}^{T_j} (Z(t) - H\hat{X}_{i+1}(t))^T (Z(t) - H\hat{X}_{i+1}(t)).$$

Шаг 6. Вычисляется текущая итерация критерия эффективности $\delta I_{i+1} = I_{i+1} - I_i$.

Если $\delta I_{i+1} \leq \Delta$, то STOP, иначе переход к шагу 3, вплоть до выполнения условия $\delta I_{i+1} \leq \Delta$.

На рис. 2 (см. с. 167) представлены результаты идентификации математической модели ДЗЗ, а на рис. 3 (см. с. 167) — результаты оценивания параметров биомассы сахарной свёклы по данным ДЗЗ.

Как видно из представленных графиков, высокое качество идентификации модели ДЗЗ обеспечивает формирование оценок всех трёх параметров биомассы свёклы, включая корнеплоды. При этом ошибка оценивания этого компонента не превышает 10 %.

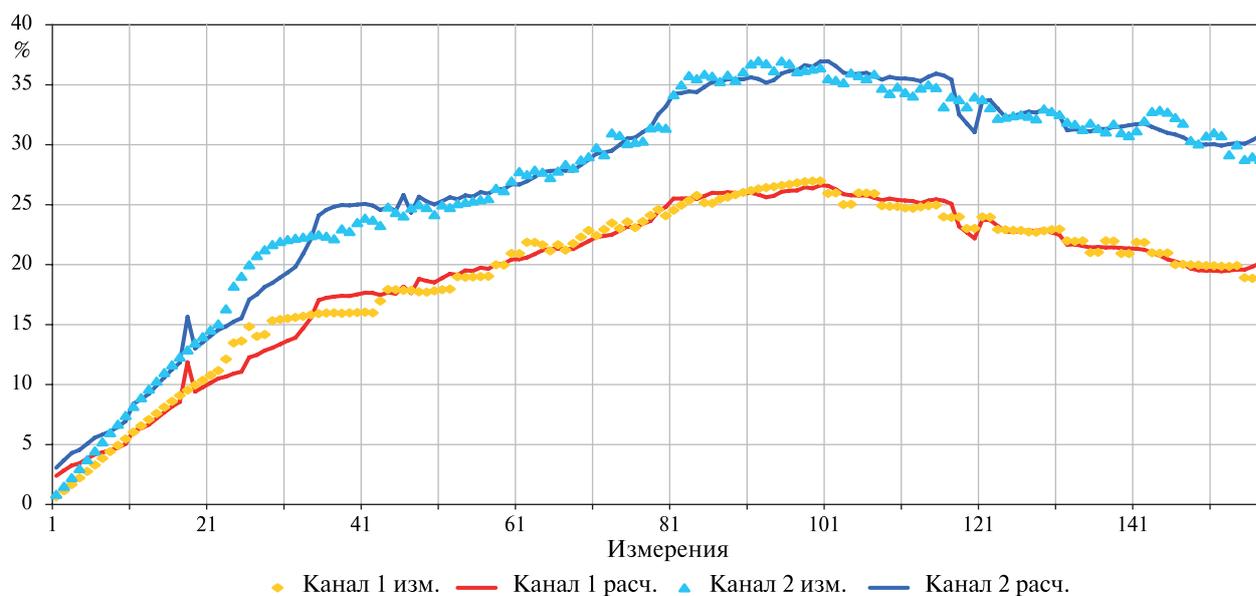


Рис. 2. Результаты идентификации математических моделей ДЗЗ для массовых показателей посева многолетних трав

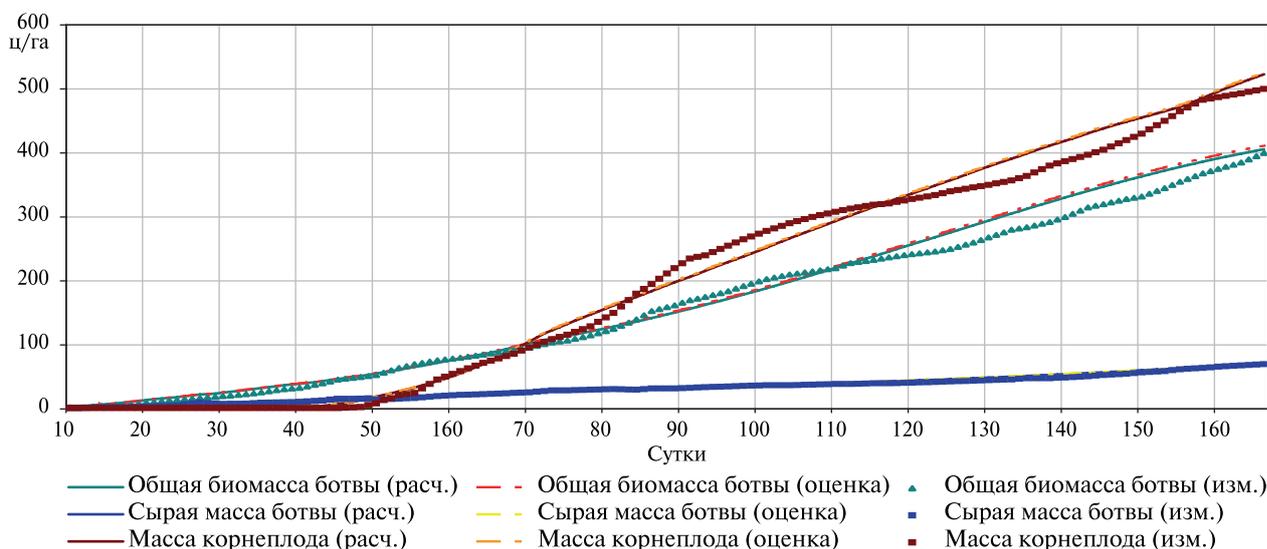


Рис. 3. Результаты оценивания параметров биомассы сахарной свёклы

Выводы

Оценивание параметров биомассы корнеплодной культуры в условиях, когда биомасса корнеплодов недоступна средствам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а число используемых каналов ДЗЗ меньше числа оцениваемых параметров, возможно при наличии трёх математических моделей: модели динамики параметров биомассы корнеплодной культуры, отражающей взаимосвязь между наземной частью биомассы и массой корнеплодов; модели ДЗЗ и модели динамики параметров состояния почвенной среды. При этом модель параметров состояния биомассы корнеплодной культуры должна удовлетворять требованиям наблюдаемости по выбранным каналам ДЗЗ, а модель параметров состояния почвенной среды обязана отражать вынос биомассой корнеплодной культуры из почвы элементов питания и влаги. Для обеспечения устойчивости и уменьшения ошибок оценивания одновременно оцениваются параметры биомассы корнеплодной культуры и параметры почвенной среды с замыканием алгоритма оценивания посредством модели ДЗЗ с реальными данными, получаемыми средствами ДЗЗ.

Литература

1. Антонов В. Н., Сладких Л. А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ // Геоматика. 2009. № 4. С. 50–53.
2. Барталев С. А., Лупян Е. А., Нейштадт И. А., Савин И. Ю. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.
3. Казаков И. Е. Методы оптимизации стохастических систем. М.: Наука, 1987. 349 с.
4. Кочубей С. М., Шадчина Т. М., Кобец Н. И. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. Киев: Наукова думка, 1990. 134 с.
5. Михайленко И. М. Основные задачи оценивания состояния посевов и почвенной среды по данным космического зондирования // Эколог. системы и приборы. 2011. № 8. С. 17–24.
6. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. Управление сроками сева по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 149–160. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-149-160.
7. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. (2018a) Оценка химического состояния почвенной среды по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 102–113. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-102-113.
8. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. (2018b) Математическое моделирование и оценивание химического состояния почвенной среды по данным дистанционного зондирования Земли // Международ. научно-исслед. журн. 2018. № 9. Ч. 2. С. 26–38. DOI: 10.23670/IRJ.2018.75.9.029.
9. Михайленко И. М., Якушев В. П. Дистанционное зондирование Земли в сельском хозяйстве // Вестн. российской с.-х. науки. 2016. № 6. С. 12–16.
10. Михайленко И. М., Тимошин В. Н., Малыгин В. Г. Принятие решений о дате заготовки кормов на основе данных дистанционного зондирования Земли и подстраиваемых математических моделей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 169–182. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-169-182.
11. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 287 с.
12. Crippen R. E. Calculating the vegetation index faster // Remote Sensing of Environment. 1990. V. 34. Iss. 1. P. 71–73. DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-Z.
13. Gamon J. A., Serrano L., Surfus J. S. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types and nutrient levels // Oecologia. 1997. V. 112. No. 4. P. 492–501. DOI: 10.1007/s004420050337.
14. Mikhailenko I. M. Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data // Intern. J. Information Technology and Operations Management. 2013. V. 1. No. 5. P. 41–51.
15. Ponzoni F. J., Borges da Silva C., Benfca dos Santos S. et al. Local illumination influence on vegetation indices and Plant Area Index (PAI) relationships // Remote Sensing. 2014. V. 6. Iss. 7. P. 6266–6282. DOI: 10.3390/rs6076266.
16. Sami K., Kushal K. C., John P. F. et al. Remote sensing in agriculture — Accomplishments, limitations, and opportunities // Remote Sensing. 2020. V. 12. Iss. 22. Article 3783. DOI: 10.3390/rs12223783.
17. Sims D. A., Gamon J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 81. Iss. 2–3. P. 337–354. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.

Estimation of the parameters of the state of biomass of root crops using remote sensing data

I. M. Mikhailenko, V. N. Timoshin

Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mails: *ilya.mihailenko@yandex.ru, v.timoshin@yandex.ru*

The article considers the problem of estimating parameters of root crop biomass using Earth remote sensing data. The underground part of the biomass of this type of crops is inaccessible to optical remote sensing. To solve this problem, it is necessary to use three mathematical models: a model of the dynamics of root crop biomass parameters reflecting the relationship between the above-ground part of the biomass and the mass of the root part of the crop; a model of soil environment parameters reflecting the removal of nutrients and moisture by the biomass of the root crop; as well as a model of optical remote sensing reflecting the relationship between the reflectance parameters in the red and near infrared ranges and the parameters of the above-ground part of the biomass. Due to the fact that the underground part of the crop is inaccessible to Earth remote sensing, special requirements are imposed on the model of the dynamics of root crop biomass parameters. It must have the property of observability that ensures the restoration of all components of the biomass when estimating it using remote sensing data. Availability of these models allows for simultaneous assessment of parameters of both root crops biomass and soil environment with the assessment algorithm data source confined to real Earth remote sensing data.

Keywords: Earth remote sensing, root crops, biomass parameters, mathematical models, estimation algorithm

Accepted: 19.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-161-170

References

1. Antonov V. N., Sladkikh L. A., Monitoring the state of crops and forecasting the yield of spring wheat based on remote sensing data, *Geomatics*, 2009, No. 4, pp. 50–53 (in Russian).
2. Bartalev S. A., Loupian E. A., Neishtadt I. A., Savin I. Yu, Classification of some types of agricultural crops in the southern regions of Russia based on MODIS satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 3, pp. 68–75 (in Russian).
3. Kazakov I. E., *Metody optimizatsii stokhasticheskikh sistem* (Methods of optimization of stochastic systems), Moscow: Nauka, 1987, 349 p. (in Russian).
4. Kochubey S. M., Shadchina T. M., Kobets N. I., *Spektral'nye svoystva rastenii kak osnova metodov distantsionnoi diagnostiki* (Spectral properties of plants as a basis for remote diagnostics methods), Kyiv: Naukova dumka, 1990, 134 p. (in Russian).
5. Mikhailenko I. M., The main tasks of assessing the state of crops and the soil environment based on space sensing data, *Ecological Systems and Devices*, 2011, No. 8, pp. 17–24 (in Russian).
6. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N., Management sowing time according to Earth remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 5, pp. 149–160 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-149-160.
7. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N. (2018a), Assessment of the chemical state of the soil environment from remote sensing data of the Earth, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 7, pp. 102–113 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-102-113.
8. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N. (2018b), Mathematical modeling and assessment of chemical state of soil medium based on data of Earth remote sensing, *Intern. Research J.*, 2018, No. 9, Pt. 2, pp. 26–38 (in Russian), DOI: 10.23670/IRJ.2018.75.9.029.
9. Mikhailenko I. M., Yakushev V. P., The Earth's remote sensing of the in agriculture, *Vestnik of the Russian agricultural science*, 2016, No. 6, pp. 12–16 (in Russian).
10. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N., Malygin V. D., Decision-making on the date of fodder harvesting based on remote sensing data of the Earth and mathematically tuned models, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 1, pp. 169–182 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-169-182.

11. Rachkulik V. I., Sitnikova M. V., *Otrazhatel'nye svoistva i sostoyanie rastitel'nogo pokrova* (Reflective properties and state of vegetation cover), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 287 p. (in Russian).
12. Crippen R. E., Calculating the vegetation index faster, *Remote Sensing of Environment*, 1990, V. 34, Iss. 1, pp. 71–73, DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-Z.
13. Gamon J. A., Serrano L., Surfus J. S., The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types and nutrient levels, *Oecologia*, 1997, V. 112, No. 4, pp. 492–501, DOI: 10.1007/s004420050337.
14. Mikhailenko I. M., Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data, *Intern. J. Information Technology and Operations Management*, 2013, V. 1, No. 5, pp. 41–51.
15. Ponzoni F. J., Borges da Silva C., Benfica dos Santos S. et al., Local illumination influence on vegetation indices and Plant Area Index (PAI) relationships, *Remote Sensing*, 2014, No. 6, Iss. 7, pp. 6266–6282, DOI: 10.3390/rs6076266.
16. Sami K., Kushal K. C., John P. F. et al., Remote sensing in agriculture — Accomplishments, limitations, and opportunities, *Remote Sensing*, 2020, No. 12, Iss. 22, Article 3783, DOI: 10.3390/rs12223783.
17. Sims D. A., Gamon J. A., Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages, *Remote Sensing of Environment*, 2002, V. 81, Iss. 2–3, pp. 337–354, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.