

Оценивание параметров состояния агроценозов 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

Цель настоящей работы — обоснование метода и средств формирования оценок количественных параметров состояния агроценозов, в составе которых имеется основная культура и сорные растения. К таким количественным параметрам относятся параметры биомассы, оценки которых в дальнейшем могут использоваться для решения задач управления агротехнологиями. Общесистемной задачей является преодоление ограниченности концепции оценивания состояния растительности, основанной на использовании различного рода вегетационных и другого рода индексов и критериев. В таком подходе не используются большие возможности современных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а формируемые индексы являются безразмерными скалярными величинами и никак не могут применяться для решения задач управления агротехнологиями. Для достижения поставленной цели используется метод комплексирования наземных измерений и данных ДЗЗ, учитывающий различия в физической размерности информации и в её пространственной распределённой. Это достигается совместным использованием математической модели динамики параметров состояния биомассы агроценоза и модели дистанционного зондирования Земли. При этом основная особенность применяемых математических моделей заключается в наличии в них пространственных координат. Для упрощения моделирования средние по площади поля оценки параметров состояния агроценоза корректируются по элементарным участкам поля посредством обучаемого линейного корректора и локальных вариаций данных ДЗЗ. Обеспечение достаточной точности и надёжности процедуры оценивания решается особым использованием различных источников информации. Так, наземные измерения, включая данные стационарных средств ДЗЗ, используются для идентификации и адаптации математических моделей, а мобильные средства ДЗЗ применяются для оценивания параметров биомассы агроценоза по всей площади поля. Исследования проводились в течение последних 10 лет на опытных полях Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института.

Ключевые слова: агроценоз, дистанционное зондирование, математические модели, алгоритм оценивания, тестовые площадки

Одобрена к печати: 22.06.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-102-114

Введение

Переход на цифровизацию и интеллектуализацию сельского хозяйства, прежде всего, связан с необходимостью автоматизации процессов управления агротехнологиями. В свою очередь, это требует надёжной информации о параметрах состояния посевов сельскохозяйственных культур и степени засорения их сорной растительностью. При этом такими параметрами являются физические и химические параметры агроценозов и почвенной среды. Оценки этих параметров позволяют принимать управляющие решения менеджменту и вырабатывать управляющие команды в автоматизированных системах управления. Основная проблема оценивания параметров состояния агроценозов заключается в том, что в его составе содержатся культурные и сорные растения. Это существенно усложняет задачу и приводит к необходимости сочетать классические методы оценивания и методы распознавания образов. При этом широко используются средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Антонов, Сладких, 2009; Барталев и др., 2006; Кочубей и др., 1990). Однако до настоящего времени при применении средств ДЗЗ наибольшее распространение получила методология, основанная на использовании различных вариантов индексов и оптических критериев (Crippen,

1990; Datt, 1999; Gamon et al., 1997). В информационном смысле индексы представляют собой скалярные величины, получаемые комбинированием параметров отражения отдельных спектральных диапазонов. Поэтому использование индексов в основном связано с грубыми экспертными оценками ситуаций на полях или с распознаванием образов с простыми дуальными альтернативами (наличие или отсутствие болезней растений, наличие стрессов различного характера, классификация земель, распознавание культур, обнаружение фенологических фаз развития культур), а также с обобщённой оценкой состояния посевов типа «нормально – ненормально» и др. (Sims, Gamon, 2002). Посредством таких простейших методов не могут решаться проблемы управления в системах точного земледелия (ТЗ), где для достижения цели управления требуются надёжные количественные оценки физических параметров состояния посевов и почвенной среды. Кроме того, при таком упрощённом подходе не используют все возможности современных мультиспектральных средств ДЗЗ.

В работах (Михайленко, 2011; Михайленко, Тимошин, 2017, 2018а, б; Mikhailenko, 2013) развивается подход, основанный на классическом оценивании параметров состояния посевов сельскохозяйственных культур по данным ДЗЗ, рассматриваемым как косвенное измерение параметров состояния объекта оценивания. Этот подход апробирован на различных кормовых культурах, биомасса которых является сырьём для приготовления кормов. Цель настоящей работы — развитие классического подхода к оцениванию параметров состояния агроценозов, имеющих в составе культурные растения с более сложной морфологической структурой и сорные растения различных видов. При этом для решения данной задачи используются не вегетационные индексы, которые не позволяют различать культурные и сорные растения, а непосредственно спектральные параметры отражения, существенно различающиеся для разных видов культур и сорных растений (Данилов и др., 2020).

Материалы и методы

Задача оценивания параметров состояния агроценоза заключается в построении в реальном времени оценок таких физических параметров, как биологическая урожайность культурного растения (количество биомассы на единицу площади), включая её товарную часть (товарная урожайность), биомасса сорного растения, а также состав общей биомассы по сухому и сырому компоненту. Оценки этих параметров используются для решения задач управления агротехнологиями. Классический подход к задаче оценивания состоит в уточнении априорной информации об оцениваемых параметрах по косвенным измерениям, которыми в рассматриваемом случае являются данные ДЗЗ, представляющие собой источник апостериорной информации о параметрах состояния агроценоза (Михайленко, 2011).

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1m}(y, h) \\ \dot{x}_{2m}(y, h) \\ \dot{x}_{3m}(y, h) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} x(t)_{1m}(y, h) \\ x(t)_{2m}(y, h) \\ x(t)_{3m}(y, h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} v_N(t, y, h) \\ v_K(t, y, h) \\ v_P(t, y, h) \\ v_{Mg}(t, y, h) \\ v_5(t, y, h) \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} d \\ d \\ 0 \end{bmatrix} g(t) + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{1m}(t) \\ \xi_{2m}(t) \\ \xi_{3m}(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$t \in (T_{1m}, T_{2m}), \quad x_{1m}(T_{1m}) = 0, \quad x_{2m}(T_{2m}) = 0, \quad x_{3m}(T_{2m}) = 0;$$

где параметрами состояния биомассы агроценоза являются: $x_{1m}(y, h)$ — биологическая урожайность культурного растения на элементарном участке с пространственными координатами (y, h) (ц/га), $x_{2m}(y, h)$ — плотность биомассы сорных растений (ц/га), $x_{3m}(y, h)$ — плотность сырой массы агроценоза (ц/га); внешне возмущения: f_1 — среднесуточная температура воздушной среды (°C), f_2 — среднесуточный уровень радиации ($Вт \cdot м^{-2} \cdot ч^{-1}$), f_3 — среднесуточная

интенсивность осадков (мм); параметры химического состояния почвы: v_N — содержание азота в почве (кг/га), v_K — содержание калия в почве (кг/га), v_P — содержание фосфора в почве (кг/га), v_{Mg} — содержание магния в почве (кг/га), v_5 — влагозапас в почве (мм), g — доза обработки агроценоза гербицидом универсального действия ($\Gamma \cdot \text{м}^{-2}$), $\xi_{1m}(t)$, $\xi_{2m}(t)$, — ошибки моделирования, представляющие собой случайные процессы с нулевыми средними и дисперсиями σ_{m1}^2 , σ_{m2}^2 , σ_{m3}^2 ; y, h — пространственные координаты (м), $t \in (T_{1m}, T_{2m})$ — суточное время, интервал вегетации от всходов до фазы колошения.

Вся априорная информация об оцениваемых параметрах агроценоза содержится в математических моделях, отражающих зависимость этих параметров от основных влияющих факторов. В настоящей работе в качестве культурного растения рассматривается яровая пшеница. В связи с тем, что посев яровой пшеницы может иметь две различающиеся между собой структуры биомассы: до колошения и после его наступления, в задаче оценивания используются две математические модели. Развёрнутая форма модели параметров биомассы агроценоза с яровой пшеницей до фазы колошения приведена выше (см. выражение (1)) (Михайленко и др., 2021).

Каноническая векторно-матричная символьная форма модели (1):

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_m(y, h) = A_m X_m(t, y, h) + B_m V(t, y, h) - D_m g(t) + C_m F(t) + \xi_m(t), \\ t \in (T_{1m}, T_{2m}), \quad X_m(T_{1m}, y, h) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где: A_m, B_m, D_m, C_m — матрицы параметров модели: соответственно динамическая, передачи управления химическими параметрами почвы, передачи управления гербицидами, передачи внешних возмущений, вид матриц соответствует развёрнутой форме модели (1).

Развёрнутая форма модели параметров биомассы агроценоза с яровой пшеницей после начала колошения имеет следующий вид (Михайленко и др., 2021):

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1u}(y, h) \\ \dot{x}_{2u}(y, h) \\ \dot{x}_{3u}(y, h) \\ \dot{x}_{4u}(y, h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}_{uu} \begin{bmatrix} x_{1u}(t, y, h) \\ x_{2u}(t, y, h) \\ x_{3u}(t, y, h) \\ x_{4u}(t, y, h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \end{bmatrix}_{uu} \begin{bmatrix} v_N(t, y, h) \\ v_K(t, y, h) \\ v_P(t, y, h) \\ v_{Mg}(t, y, h) \\ v_5(t, y, h) \end{bmatrix} - \\ - \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ 0 \end{bmatrix}_{uu} g(t) + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}_{uu} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{1u}(t) \\ \xi_{2u}(t) \\ \xi_{3u}(t) \\ \xi_{4u}(t) \end{bmatrix}, \\ t \in (T_{1u}, T_{2u}), \quad x_{1u}(T_{1u}, y, h) = x_{1u,0}(y, h), \quad x_{2u}(T_{1u}, y, h) = x_{2u,0}(y, h), \\ x_{3u}(T_{1u}, y, h) = x_{3u,0}(y, h), \quad x_{4u}(T_{1u}, y, h) = x_{4u,0}(y, h), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где параметрами состояния биомассы агроценоза являются: $x_{1u}(y, h)$ — биологическая урожайность культурного растения (яровой пшеницы) на элементарном участке с пространственными координатами (y, h) (ц/га); $x_{2u}(y, h)$ — плотность биомассы сорных растений (ц/га); $x_{3u}(y, h)$ — масса колосьев яровой пшеницы (урожая) (ц/га); $x_{4u}(y, h)$ — плотность сырой массы агроценоза (ц/га); $\xi_{1u}(t)$, $\xi_{2u}(t)$, $\xi_{3u}(t)$, $\xi_{4u}(t)$ — ошибки моделирования, представляющие собой случайные процессы с нулевыми средними и дисперсиями σ_{m1}^2 , σ_{m2}^2 , σ_{m3}^2 , σ_{m4}^2 ; (y, h) — пространственные координаты (м); $t \in (T_{1m}, T_{2m})$ — суточное время, интервал вегетации от фазы колошения до фазы созревания.

Каноническая векторно-матричная символьная форма модели:

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_u(y, h) = A_u X_u(t, y, h) + B_u V(t, y, h) - D_u g(t) + C_u F(t) + \xi_u(t), \\ t \in (T_{1u}, T_{2u}), \quad X_u(T_{1u}, y, h) = X_{u0}(y, h), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где: A_u, B_u, D_u, C_u — матрицы параметров модели: соответственно динамическая, передачи управлений химическими параметрами почвы, передачи управления гербицидами, передачи внешних возмущений, вид матриц соответствует развёрнутой форме модели (3).

Априорная информация о параметрах состояния биомассы агроценоза, формируемая моделями (2), (4), должна корректироваться по реальным данным ДЗЗ, для чего вводятся модели оптических измерений (модели ДЗЗ).

Модель оптических измерений для состояния биомассы агроценоза с яровой пшеницей на период до начала колошения имеет следующий вид в векторно-матричной символической форме (Михайленко и др., 2021):

$$Z_m(y, h) = P_m W(X_m(y, h)) + \xi_m, \quad (5)$$

где: $Z_m^T(y, h) = [z_{1m}(y, h) \ z_{2m}(y, h) \ z_{3m}(y, h)]$, — вектор параметров отражения для пространственной координаты (y, h) на каналах z_1 — 668 нм, z_2 — 717 нм и z_3 — 840 нм;

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} & p_{18} & p_{19} & p_{110} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} & p_{27} & p_{28} & p_{29} & p_{210} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} & p_{37} & p_{38} & p_{39} & p_{310} \end{bmatrix} \text{ — матрица параметров модели;}$$

$W(X_m(y, h)) = [1 \ x_{1m}(y, h) \ x_{2m}(y, h) \ x_{3m}(y, h) \ x_{1m}^2(y, h) \ x_{2m}^2(y, h) \ x_{3m}^2(y, h) \ x_{1m}^3(y, h) \ x_{2m}^3(y, h) \ x_{3m}^3(y, h)]$ — вектор-функция, где аргументами являются параметры состояния агроценоза; $\xi_{1m}(t), \xi_{2m}(t), \xi_{3m}(t)$ — случайные ошибки измерений, имеющие нулевые средние и дисперсии $e_{1m}^2, e_{2m}^2, e_{3m}^2$.

Модель оптических измерений состояния биомассы агроценоза с яровой пшеницей на период от начала колошения до созревания урожая может быть представлена в векторно-матричной символической форме:

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

где $Z_u^T(y, h) = [z_{1u}(y, h) \ z_{2u}(y, h) \ z_{3u}(y, h) \ z_{4u}(y, h)]$ — вектор параметров отражения для пространственной координаты (y, h) на каналах z_1 — 475 нм, z_2 — 668 нм и z_3 — 717 нм, z_4 — 840 нм;

$$P_u = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} & p_{18} & p_{19} & p_{110} & p_{111} & p_{112} & p_{113} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} & p_{27} & p_{28} & p_{29} & p_{210} & p_{211} & p_{212} & p_{213} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} & p_{37} & p_{38} & p_{39} & p_{310} & p_{311} & p_{312} & p_{313} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} & p_{47} & p_{48} & p_{49} & p_{410} & p_{411} & p_{412} & p_{413} \end{bmatrix}_u \text{ — матрица па-}$$

раметров модели;

$W(X_u(y, h)) = [1 \ x_{1u}(y, h) \ x_{2u}(y, h) \ x_{3u}(y, h) \ x_{4u}(y, h) \ x_{1u}^2(y, h) \ x_{2u}^2(y, h) \ x_{3u}^2(y, h) \ x_{4u}^2(y, h) \ x_{1u}^3(y, h) \ x_{2u}^3(y, h) \ x_{3u}^3(y, h) \ x_{4u}^3(y, h)]$ — вектор-функция, где аргументами являются параметры состояния агроценоза.

Главная особенность и новизна представленных векторно-матричных математических моделей (1)–(6) состоит в том, что здесь компонентами векторов являются не скалярные или векторные величины, а двумерные распределения соответствующих параметров биомассы в динамических моделях состояния и параметров отражения в моделях ДЗЗ. Такие модели могут быть отнесены к разновидности 3D-моделей. Это значительно усложняет алгоритмы моделирования и оценивания и приводит к необходимости введения пространственных циклов, где число переменных зависит от способа разбивки общей поверхности поля на элементарные участки. Так, при площади элементарного участка 2 м^2 число циклических переменных составит 5000 на один гектар площади поля. При общей площади поля под посевом 500 га общее число элементарных участков и циклов алгоритма составит $2,5 \cdot 10^6$ ед. Поэтому при больших площадях посевов (более 1000 га) целесообразно использование

аппроксимационных схем моделирования и оценивания. Суть таких схем заключается в том, что сначала моделируются (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).

$$\left. \begin{aligned} \hat{X}(t, y, h) &= \bar{X}(t) + \Delta \hat{X}(t, y, h), \\ \Delta \hat{X}(t, y, h) &= K(t) \Delta Z(t, y, h), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где: $K(t)$ — матрицы пространственного корректора для моделей (2), (4), параметры которых оцениваются путём формирования массива вариаций параметров отражения ДЗЗ $\Delta Z(t, y, h)$ и оценок параметров почвенной среды $\Delta V(t)$ и биомассы $\Delta \hat{X}(t, y, h)$ по 30–40 элементарным участкам для заданных моментов времени t . Такими моментами времени являются только те, в которые выполняются технологические операции. В другие моменты времени матрицы пространственного корректора не строятся.

При этом для формирования оценок параметров биомассы $\hat{X}(t, y, h)$ на выбранных элементарных участках используется следующий алгоритм локального оценивания, построенный на основе моделей (2), (4), в которых опущены индексы принадлежности к временным интервалам (Казаков, 1987; Михайленко и др., 2021):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{X}}(t, y, h) &= A \hat{X}(t, y, h) + B V(t, y, h) + C F(t) + R(t, y, h) P \frac{\partial W^T(\hat{X})}{\partial \hat{X}} K_z^{-1} (Z(t, y, h) - \\ &\quad - P W(\hat{X}(t, y, h))), \\ \dot{R}(t, y, h) &= R(t, y, h) A^T + A R(t, y, h) - R(t, y, h) P \frac{\partial W^T(\hat{X})}{\partial \hat{X}} K_z^{-1} \frac{\partial W(\hat{X})}{\partial \hat{X}} P^T R(t, y, h), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

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

Для оценивания средних оценок параметров состояния биомассы по площади поля используется такой же по форме алгоритм (8) без учёта пространственных переменных, на вход которого подаётся усреднённый вектор параметров отражения $Z(t)$.

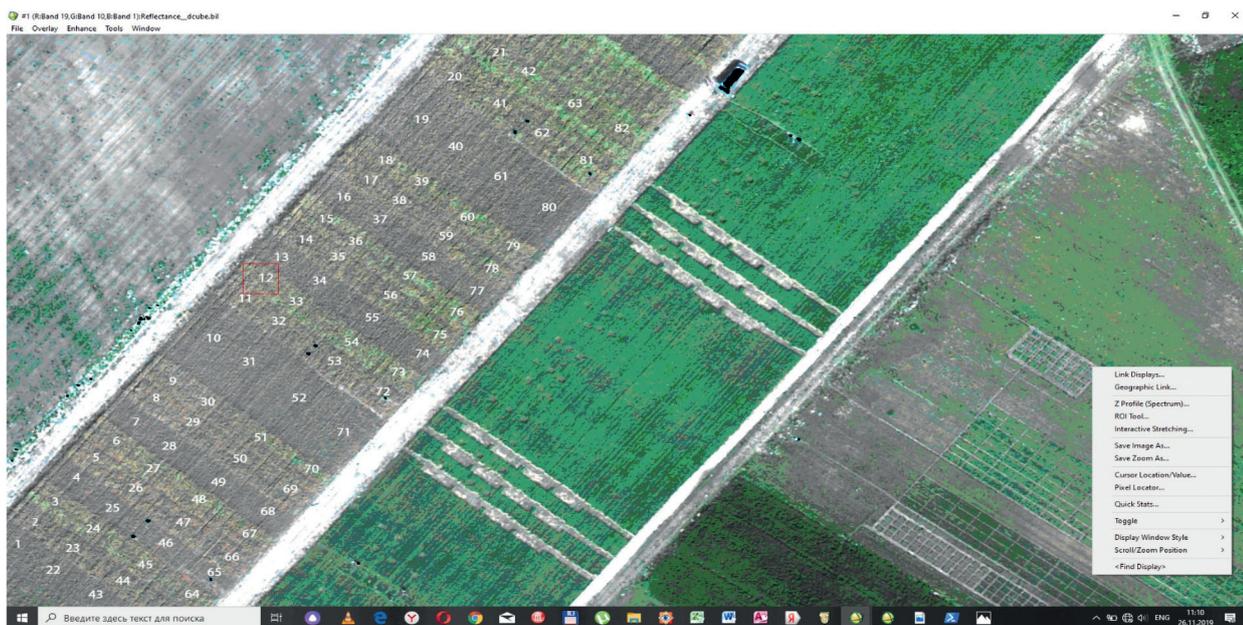


Рис. 1. Фрагмент съёмки опытного поля с посевом яровой пшеницы на стадии молочно-восковой спелости

Исследования проводились в течение вегетационных периодов 2018–2020 гг. на Меньковском филиале Агрофизического научно-исследовательского института, расположенном в Гатчинском р-не Ленинградской обл. Объект исследований входит в состав агрофизического стационара института, который обеспечен всем комплексом приборно-измерительной техники, включая средства ДЗЗ. Исследования отобранных образцов проводились в сертифицированной аналитической лаборатории института.

На *рис. 1* (см. с. 106) представлен фрагмент съёмки опытного поля с посевом яровой пшеницы на стадии молочно-восковой спелости (зелёный цвет). Здесь выделены тестовые площадки (белые пятна), с которых ежедневно отбирались пробы растений и почвы, по которым формировалась информация о параметрах состояния агроценоза в соответствии с моделями (2), (4). Тестовые участки представляют собой выделенные площадки посева исследуемой культуры площадью 20–30 м² с известными географическими координатами, к которым обеспечен доступ для отбора проб. Для удобства съёмки тестовые площадки выделялись специальными маркерами белого цвета.

Одновременно с отбором проб стационарными средствами ДЗЗ фиксировались среднесуточные параметры отражения на тестовых площадках в вышеуказанных спектральных диапазонах. Полученные суточные данные использовались для идентификации моделей (2), (4), (5), (6).

Результаты и обсуждение

Важнейшим условием, определяющим возможность решения всей задачи оценивания состояния агроценоза, является качество идентификации моделей ДЗЗ (5), (6).

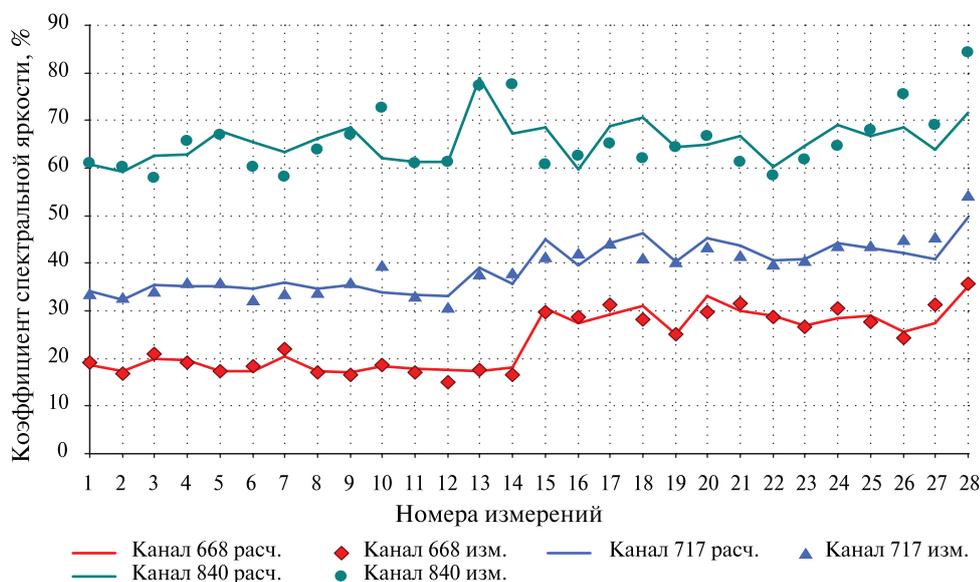


Рис. 2. Процесс идентификации модели ДЗЗ для агроценоза на интервале времени, предшествующем колошению яровой пшеницы

На *рис. 2, 3* (см. с. 108) представлены процессы идентификации этих моделей. На обоих графиках по горизонтальной оси отложены номера элементарных участков (тестовых площадок), на которых отбирались пробы и для которых были известны экспериментальные значения параметров биомассы агроценоза, включая посев яровой пшеницы и сорные растения. По вертикальной оси откладывались параметры отражения (коэффициенты спектральной яркости) по используемым спектральным каналам. Для периода, предшествующего колошению яровой пшеницы, это: зелёный диапазон (500–565 нм), красный (625–740 нм) и ближний

инфракрасный (740–900 нм) диапазоны. Для периода между фазами колошения и полной зрелости это: зелёный диапазон (500–565 нм), 1-й красный (625–700 нм), 2-й красный (700–750 нм) и ближний инфракрасный (750–950 нм) диапазоны. Выбор спектральных каналов обусловливался технической базой используемого средства ДЗЗ, представлявшего собой беспилотный летательный аппарат «Геоскан 401», оборудованный мультиспектральной оптической камерой MikoSens RedH MX.

При этом на графиках геометрическими точками отмечены экспериментальные значения параметров отражения, а сплошными линиями — расчётные, полученные посредством моделей (5), (6).

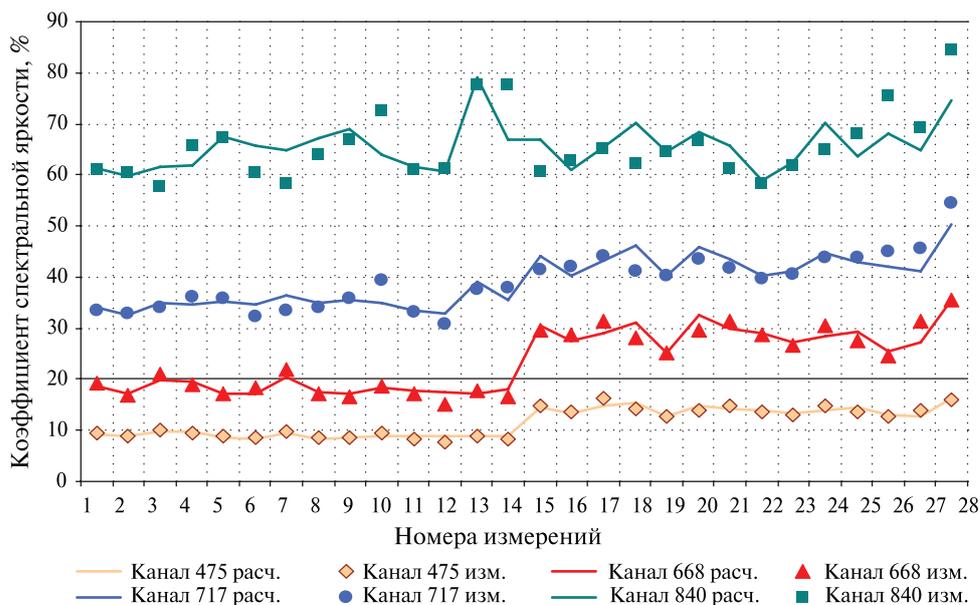


Рис. 3. Процесс идентификации модели ДЗЗ для агроценоза на интервале времени между фенофазами колошения и полного созревания яровой пшеницы

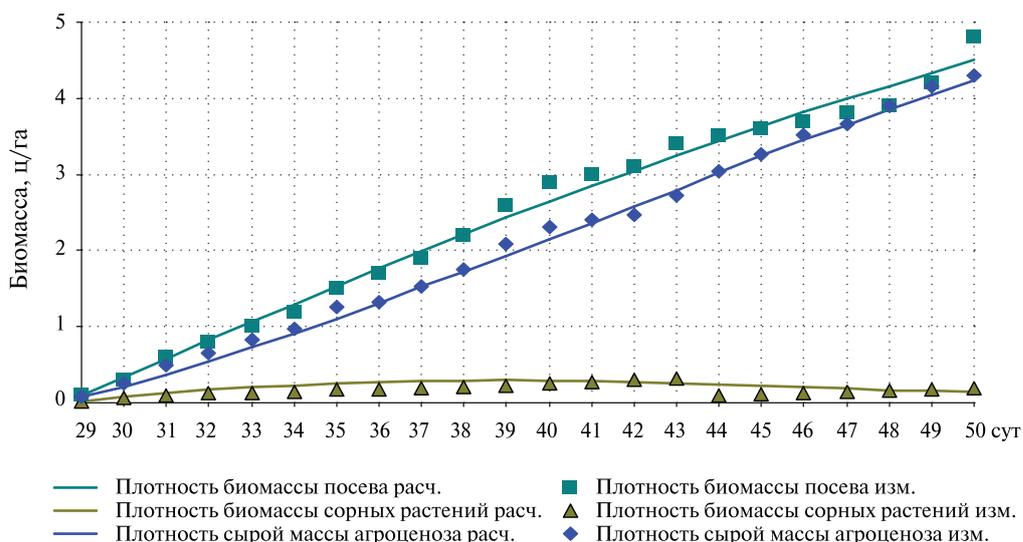


Рис. 4. Процесс оценивания средних по площади поля параметров агроценоза на интервале времени, предшествующем фенофазе колошения яровой пшеницы

Как видно из полученных результатов идентификации, обе модели имеют точность, достаточную для решения задачи оценивания параметров агроценоза по реальным данным ДЗЗ.

Ошибки моделирования в моделях укладываются в допуск $\pm 5\%$. Решения моделей равномерно покрывают область возможных значений параметров отражения и не пересекаются между собой, что говорит об информативности используемых спектральных каналов.

На *рис. 4* (см. с. 108) представлены результаты оценивания средних по площади поля параметров агроценоза на интервале времени, предшествующем фенофазе колошения посева яровой пшеницы.

Здесь по горизонтальной оси отложены моменты времени в сутках рассматриваемого интервала вегетации агроценоза, по вертикальной оси геометрическими точками изображены средние по полю экспериментальные значения параметров биомассы агроценоза, а сплошными линиями показаны их оценки, полученные по данным ДЗЗ. Как видно из графиков, процесс оценивания имеет устойчивый характер, а его ошибка укладывается в допуск $\pm 5\%$, что вполне приемлемо для решения последующих задач управления состоянием агроценоза.

Идентификация по экспериментальным данным математической модели динамики параметров состояния агроценоза на интервале времени между фенофазами колошения и полной зрелости показал, что при одной и той же форме её параметры существенно изменяются между отдельными фенофазами. Это привело к необходимости разбивки интервала времени от начала колошения до созревания на несколько межфазовых периодов. Процесс оценивания параметров агроценоза на этих периодах представлен на *рис. 5–7* (см. с. 110).

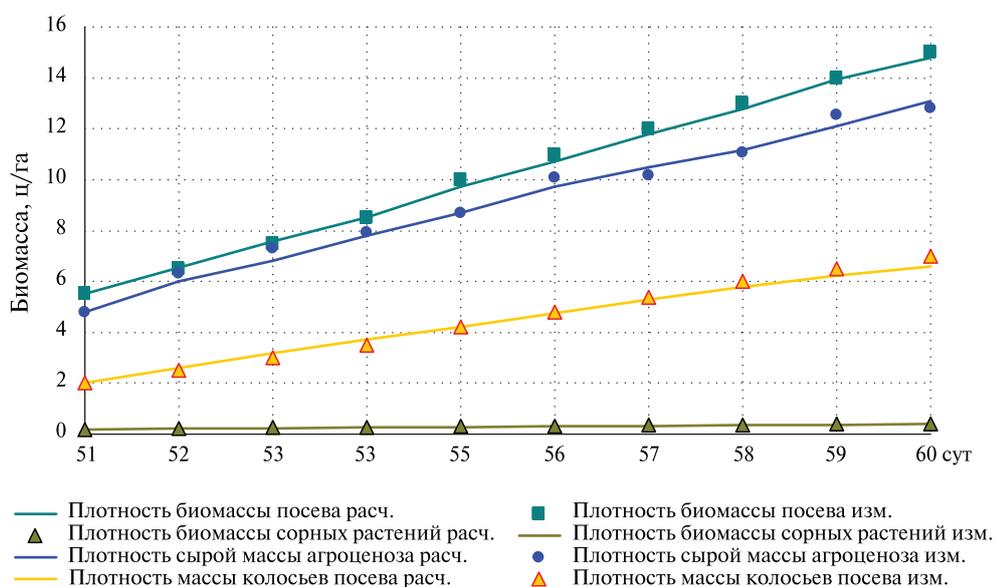


Рис. 5. Процесс оценивания средних по площади поля параметров агроценоза на интервале времени между фенофазами колошения и цветения яровой пшеницы

Как видно из результатов идентификации, обе модели имеют точность, достаточную для решения задачи оценивания параметров агроценоза по реальным данным ДЗЗ. Ошибки моделирования в моделях укладываются в допуск $\pm 5\%$. Решения моделей равномерно покрывают область возможных значений параметров отражения и не пересекаются между собой, что говорит об информативности используемых спектральных каналов.

Как и для периода, предшествующего фенофазе колошения яровой пшеницы, процесс оценивания средних по площади поля параметров биомассы агроценоза имеет устойчивый характер, а ошибка оценивания не превышает допуск $\pm 10\%$.

Оценки средних по площади поля оценок параметров биомассы основной культуры и сорных растений могут использоваться для принятия управляющих решений по нормам внесения удобрений и дозам обработки гербицидами по всей площади поля. Для дифференциации этих технологических операций необходимы оценки параметров биомассы агроценоза по всем элементарным участкам. Для этого требуется коррекция оценок по всем элементарным

участкам поля с использованием корректоров (7). В отличие от средних по полю оценок параметров, которые строятся непрерывно во времени, корректоры (7) строятся только в моменты времени выполнения технологических операций.

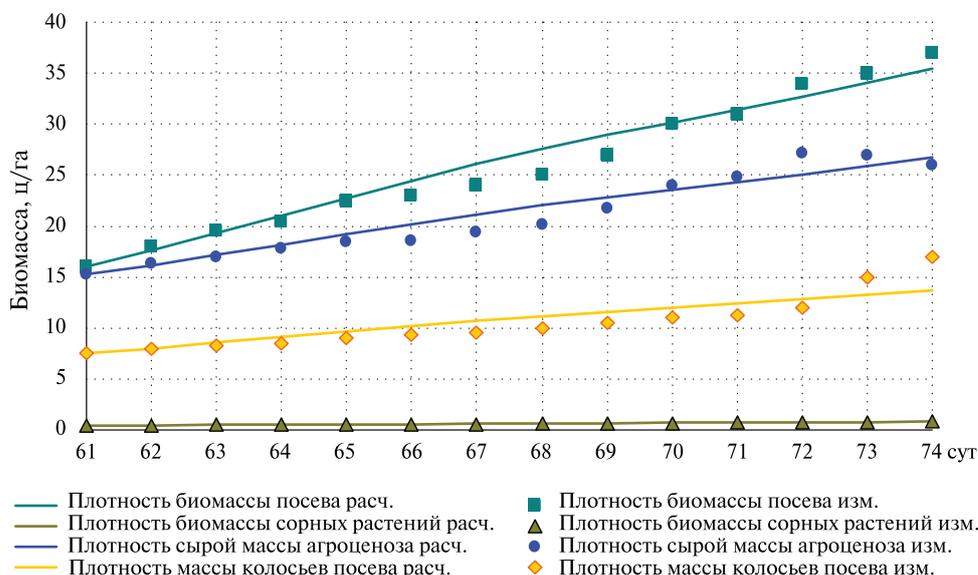


Рис. 6. Процесс оценивания средних по площади поля параметров агроценоза на интервале времени между фенофазами цветения и молочно-восковой спелости яровой пшеницы

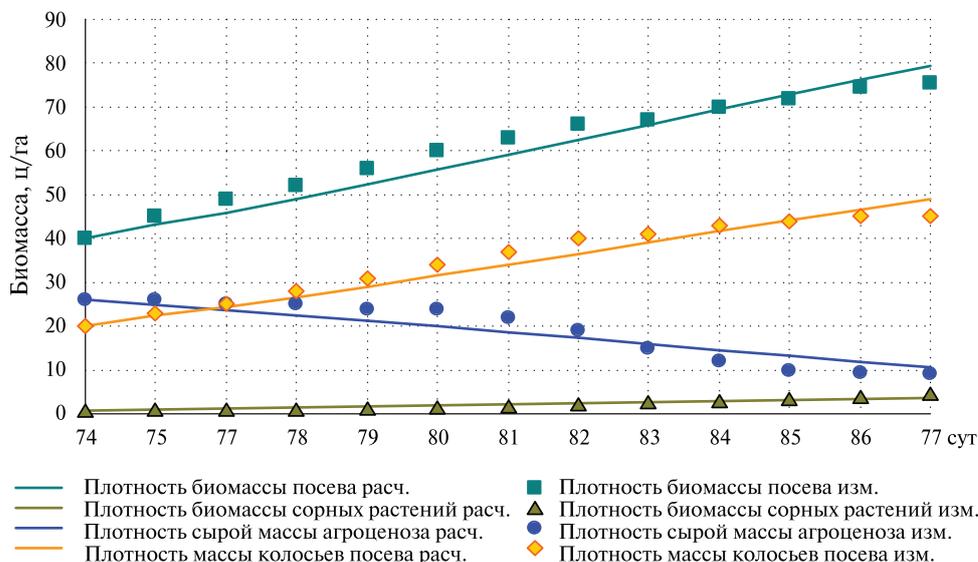


Рис. 7. Процесс оценивания средних по площади поля параметров агроценоза на интервале времени между фенофазами молочно-восковой спелости и полного созревания яровой пшеницы

На рис. 8 (см. с. 111) приведены графики построения пространственных корректоров по 20 тестовым участкам для 73 сут вегетации. На рис. 9 (см. с. 111) представлены графики пространственной коррекции параметров биомассы агроценоза для 73 сут периода вегетации яровой пшеницы. Аналогично по данным ДЗЗ формируются оценки параметров агроценоза по всей остальной площади поля для других моментов времени. Эти оценки могут использоваться для формирования локальных доз внесения минеральных удобрений и обработок гербицидами сорных растений.

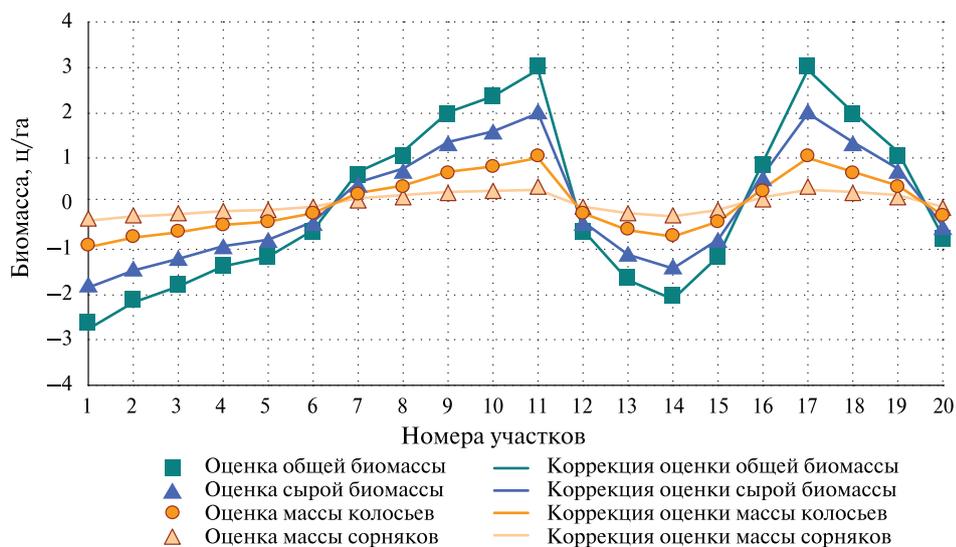


Рис. 8. Процесс идентификации пространственного корректора для 73 сут вегетации посева яровой пшеницы

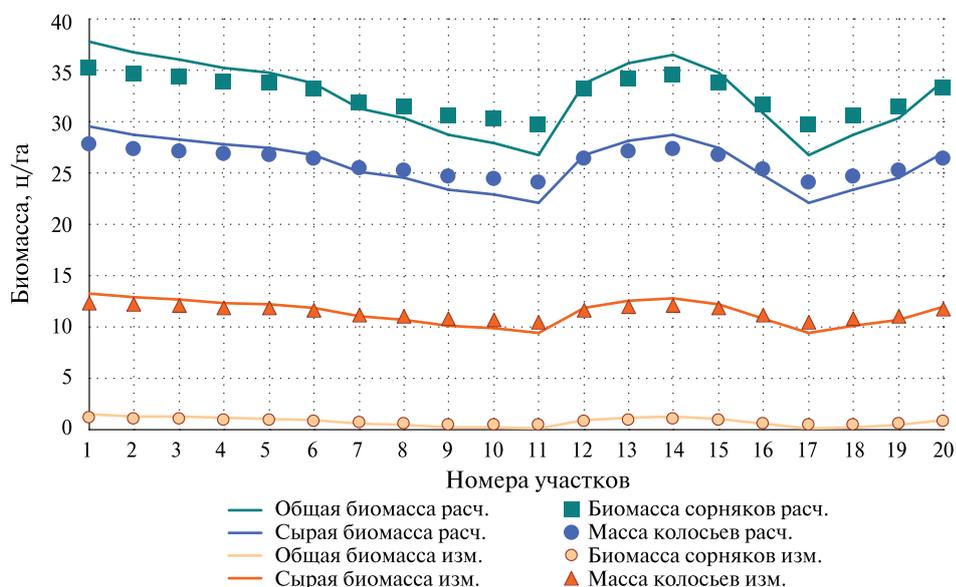


Рис. 9. Процесс пространственной коррекции оценок параметров биомассы для 73 сут вегетации посева яровой пшеницы

Выводы

Проблема оценивания параметров состояния биомассы агроценоза, включающего в себя основную культуру и сорные растения, заключается в необходимости комплексирования наземных измерений и данных дистанционного зондирования Земли. Суть проблемы комплексирования заключается в том, что наземные измерения точечные, а данные ДЗЗ имеют распределённый характер. Эта проблема решается посредством введения математической модели динамики параметров состояния биомассы агроценоза. Модель учитывает все влияющие факторы, имеет пространственные координаты и является источником априорной информации о параметрах состояния биомассы агроценоза. Для уточнения этой информации по текущим данным ДЗЗ вводится математическая модель связи оцениваемых параметров состояния с данными ДЗЗ. Это позволяет за счёт согласования разной физической размерности моделей объединить их в единый алгоритм оценивания, формирующий оценки параметров

состояния биомассы агроценоза с достаточной точностью. При этом наземные измерения, включая данные стационарных средств ДЗЗ, проводят на выделенных 15–29 тестовых площадках с аналогичным составом агроценоза, имеющих площадь по 10–20 м² и различающихся между собой разными дозами внесения удобрений, нормами поливов и степенью засорённости сорными растениями. Причём наземные измерения используются для оценивания параметров математических моделей, а данные ДЗЗ — для формирования оценок параметров биомассы агроценоза по всей площади поля. Для упрощения процедуры оценивания она реализуется в два этапа, когда на первом формируются оценки средних по площади поля значений параметров биомассы агроценоза, а на втором они корректируются по элементарным участкам поля посредством линейного пространственного корректора, формирующего поправки оценок по локальным вариациям данных ДЗЗ. В связи с тем, что оценки состояния агроценоза будут использоваться для задач управления агротехнологиями, в качестве дальнейшего развития исследований следует указать на необходимость выявления видового состава сорных растений и их доли в общей биомассе. Кроме того, актуальна проблема построения моделей и алгоритмов оценивания для других культур и агроценозов.

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., Луян 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. Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Исмаилов В. Я., Третьяков В. А., Ризванов А. А., Кривошеин В. В., Пачкин А. А. Общая методика и результаты наземных гиперспектральных исследований сезонного изменения отражательных свойств посевов сельскохозяйственных культур и отдельных видов сорных растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 113–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127.
4. Казаков И. Е. Методы оптимизации стохастических систем. М.: 1987, Наука. 349 с.
5. Кочубей С. М., Шадчина Т. М., Кобец Н. И. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. Киев: Наукова думка, 1990. 134 с.
6. Михайленко И. М. Основные задачи оценивания состояния посевов и почвенной среды по данным космического зондирования // Экологические системы и приборы. 2011. № 8. С. 17–25.
7. 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.
8. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. (2018а) Оценивание 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.
9. Михайленко И. М., Тимошин В. Н. (2018б) Математическое моделирование и оценивание химического состояния почвенной среды по данным дистанционного зондирования Земли // Международный научно-исслед. журн. 2018. № 9(75). Ч. 2. С. 26–38. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.029>.
10. Михайленко И. М., Тимошин В. Н., Веллер В. Е. Оценивание параметров биомассы посева яровой пшеницы // Вестн. российской сельскохозяйственной науки. 2021. № 1. С. 4–8. DOI: 10.30850/vrsn/2021/1/4-8.
11. Crippen R. E. Calculating the Vegetation Index Faster // Remote Sensing of Environment. 1990. V. 34. P. 71–73. DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-z.
12. Datt B. A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests Using Eucalyptus Leaves // J. Plant Physiology. 1999. V. 1. P. 30–36. DOI: 10.1016/S0176-1617(99)80314-9.
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(4). P. 492–501. <http://dx.doi.org/10.1007/s004420050337>.
14. Mikhailenko I. M. Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data // Intern. J. Information Technology and Operation Management. 2013. V. 1. No. 5. P. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.029>.

15. 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(2–3). P. 337–354. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.

Estimation of the parameters of agroecosystem state from Earth 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 purpose of this work is to substantiate the method and means of forming estimates of quantitative parameters of the state of agroecosystems, which include the main crop and weeds. These quantitative parameters include biomass parameters, the estimates of which can be used in the future to solve the problems of agricultural technology management. The system-wide task is to overcome the limitations of the concept of assessing the state of vegetation based on the use of various types of vegetation and other kinds of indices and criteria. This approach does not use the great capabilities of modern means of remote sensing of the Earth, and the generated indices are dimensionless scalar quantities and cannot in any way be used to solve problems of managing agricultural technologies. To achieve this goal, the method of integrating ground-based measurements and remote sensing data is used, taking into account differences in the physical dimension of information and in its spatial distribution. This is achieved by the combined use of a mathematical model of the dynamics of the parameters of the state of the biomass of the agroecosystems and the Earth remote sensing model. In this case, the main feature of the used mathematical models is the presence of spatial coordinates in them. To simplify modeling, the field-average estimates of the parameters of the agroecosystems state are corrected for elementary areas of the field by means of a trained linear corrector and local variations of remote sensing data. Ensuring sufficient accuracy and reliability of the assessment procedure is solved by special use of various sources of information. So, ground measurements, including data from stationary remote sensing devices, are used to identify and adapt mathematical models, and mobile remote sensing devices are used to estimate the parameters of the biomass of the agroecosystems over the entire area of the field. Research has been carried out over the past 10 years on the experimental fields of the Menkovo branch of the Agrophysical Research Institute.

Keywords: agroecosystems, remote sensing, mathematical models, estimation algorithm, test sites

Accepted: 22.06.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-102-114

References

1. Antonov V., Sladkikh L., Crop monitoring and spring wheat yields forecasting basing 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., Gropland area classification in south regions of Russia using MODIS satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 3, pp. 68–75 (in Russian).
3. Danilov R. Yu., Kremneva O. Yu., Ismailov V. Ya., Tretyakov V. A., Rizvanov A. A., Krivoshein V. V., Pachkin A. A., General method and results of ground hyperspectral studies of seasonal changes in the reflective properties of crops and certain species of weeds, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 113–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127.
4. Kazakov I. E., *Metody optimizatsii stokhasticheskikh sistem* (Methods of Optimization of Stochastic Systems), Moscow: Nauka, 1987, 349 p. (in Russian).
5. Kochubei 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 diagnostic methods), Kiev: Naukova Dumka, 1990, 134 p. (in Russian).

6. Mikhailenko I. M., Main tasks evaluation crop condition and soil emissions on this space sensing, *Ekologicheskie sistemy i pribory*, 2011, No. 8, pp. 17–25 (in Russian).
7. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N., Management of sowing time according to Earth remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 149–160 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-149-160.
8. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N. (2018a), Assessment of the chemical state of soil environment from remote sensing data of the Earth, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 102–113 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-102-113.
9. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N. (2018b), Mathematical modeling and assessment of chemical state of soil medium based on data of Earth remote sensing, *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2018, No. 9(75), Part 2, pp. 26–38 (in Russian), DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.029>.
10. Mikhailenko I. M., Timoshin V. N., Veller V. E., Assessment of the biomass of spring wheat sowing, *Vestnik Rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*, 2021, No. 1, pp. 4–8 (in Russian), DOI: 10.30850/vrsn/2021/1/4-8.
11. Crippen R. E., Calculating the Vegetation Index Faster, *Remote Sensing of Environment*, 1990, Vol. 34, pp. 71–73, DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-z.
12. Datt B., A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests Using Eucalyptus Leaves, *J. Plant Physiology*, 1999, Vol. 1, pp. 30–36, DOI: 10.1016/S0176-1617(99)80314-9.
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, *Ecology*, 1997, Vol. 4, pp. 492–501, available at: <http://dx.doi.org/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, Vol. 1, No. 5, pp. 41–51, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.029>.
15. 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, Vol. 81(2–3), pp. 337–354, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.