

Принятие решений о дате заготовки кормов на основе данных дистанционного зондирования Земли и подстраиваемых математических моделей

И. М. Михайленко, В. Н. Тимошин, В. Д. Малыгин

*Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия*

E-mails: ilya.mihailenko@yandex.ru, timoshinv@yandex.ru, vitsimf1@gmail.com

Представлены научно-методические основы системы принятия агрономической службой решений о дате уборки культуры на основе данных дистанционного зондирования и наземных измерений. Отработка задачи выполнена на примере многолетних трав, являющихся сырьём для приготовления кормов для молочного скота. Суть принимаемого решения заключается в нахождении компромисса между количеством и качеством убираемой биомассы. Оно соответствует минимуму критерия, представляющего собой взвешенную сумму квадратов отклонений от заданных значений урожайности биомассы и показателя её переваримости. Для прогнозирования критерия предложены динамические модели параметров состояния биомассы и показателей её качества. Текущие оценки параметров состояния биомассы осуществляются по данным дистанционного зондирования посредством алгоритма оптимальной фильтрации, основу которого составляют динамические модели параметров состояния биомассы, дополненные моделью оптического измерения. При этом текущие оценки параметров состояния биомассы являются начальными условиями для прогнозирования критерия принятия решения о дате уборки.

Ключевые слова: решения о дате проведения уборки, данные дистанционного зондирования Земли, математические модели, оптимальные оценки, показатели качества биомассы многолетних трав

Одобрена к печати: 31.12.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-169-182

Введение

Переход от сырьевой к цифровой экономике подразумевает развитие сектора электронных товаров и услуг, среди которых особенно востребованы средства поддержки управленческих решений. Наиболее остро потребность в таких услугах ощущается в сельском хозяйстве, где принятие оперативных управленческих решений представляет собой серьёзную научно-техническую проблему. Это связано со значительным числом управляемых объектов в виде полей с посевами сельскохозяйственных культур и большими площадями самих полей, находящимися под воздействием многих возмущений, среди которых наиболее действенными являются природно-климатические факторы. Поэтому для получения оперативной информации о состоянии сельскохозяйственных угодий в современных аграрных системах мониторинга широко используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), поступающие от средств спутникового, авиационного и приземного базирования. В связи с этим представляется очень актуальным предоставление услуг по поддержке управленческих решений на основе мониторинговой информации, включающей в себя данные ДЗЗ. Однако, несмотря на очевидный прогресс в области применения средств ДЗЗ, наблюдается явное отставание в развитии методов использования этой информации в системах поддержки принятия управленческих решений. Наибольшее распространение сегодня имеют методы оценивания состояния посевов сельскохозяйственных культур на основе разного рода индексов, представляющих собой комбинации параметров отражения на различных каналах оптического спектра. Среди этих индексов чаще всего применяется нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), концепция которого была представлена в работе (Kriegler et al., 1969), а сам он впервые описан в статье (Rouse et al., 1973). Впоследствии этот индекс был трансформирован

в различные варианты, такие как относительный вегетационный индекс (RVI), разностный вегетационный индекс (DVI), а также инфракрасный вегетационный индекс, которые впервые были описаны в работах (Jordan, 1969; Lillesand, Kiefer, 1987; Crippen, 1990) соответственно. Примеры использования этих индексов можно найти в работах отечественных (Антонов, Сладких, 2009; Барталев и др., 2006; Черепанов, 2011; Шагиев и др., 2011) и иностранных (Hill, Carey, 1997; Lawrence, 1998) авторов. По своей сути вегетационные индексы представляют собой скалярные величины, что не позволяет получить на их основе многокомпонентную информацию о массовых и качественных показателях посевов, необходимую для принятия управленческих решений. Наиболее важными и ответственными являются решения о сроках уборки урожая сельскохозяйственных культур — они особенно актуальны в задачах управления процессами заготовки кормов из многолетних трав и принимаются в течение вегетационного периода неоднократно. Здесь ошибки в принятии решения могут привести как к недобору урожая, так и к потерям качества получаемого корма. Это обусловлено тем, что в процессе вегетации одновременно с нарастанием величины биомассы травостоя происходит снижение значений показателей её качества. Поэтому при принятии решений о сроках заготовки кормов следует иметь в виду, что объективно существует момент достижения компромисса между количественными и качественными показателями убираемой биомассы. Разработка методики и средств поддержки принятия управленческих решений для многолетних трав может быть распространена на зерновые и технические культуры, урожай которых формируется над поверхностью почвы и для оценивания состояния посевов которых возможно использование средств ДЗЗ.

Задачей настоящей работы является рассмотрение методики и программно-алгоритмических средств системы поддержки принятия решений о сроках заготовки кормов на основе мониторинговой информации, включающей в себя данные ДЗЗ и необходимый минимум наземных измерений.

Выбор критерия оптимальности и математических моделей для его прогнозирования

Исходя из смысла рассматриваемой задачи, который состоит в принятии решений о дате уборки урожая многолетних трав на основе мониторинговой информации, мы выделяем следующие этапы, необходимые для её реализации:

- обоснование критерия оптимальности принятия решений;
- выявление параметров состояния посевов, на основе которых формируются оптимальные решения;
- выбор математических моделей, формирующих искомые параметры состояния;
- выбор методики оценивания параметров используемых математических моделей;
- выбор методики оценивания параметров состояния по мониторинговой информации, включающей данные ДЗЗ и наземные измерения;
- построение правила принятия оптимальных решений;
- апробация полученных результатов.

Выбор удобного и актуального критерия принятия решений является отправным пунктом этапов реализации вышеуказанной задачи. Такой критерий должен отражать баланс между количественными и качественными показателями травостоя. При этом количественным показателем является общая биомасса травостоя, включая сухое вещество и влагу, а качественными — содержание в сухом веществе протеина, углеводов и клетчатки. Обычно технологи оценивают классность кормов из подвяленных трав, где нормируется величина обменной энергии:

$$E(k, p) = 0,82 + \frac{23,5}{k} + 0,07 p \text{ (МДж / кг сух. вещества)}, \quad (1)$$

где k и p — процентное содержание в сухом веществе клетчатки и сырого протеина соответственно.

В то же время качественные показатели готового корма влияют на его переваримость (усваиваемость) животными. Этот показатель (π) имеет наиболее широкое распространение в молочном животноводстве, он оценивается в процентах и может быть определён следующей регрессионной зависимостью:

$$\pi(k, p) = b_0 + b_1k + b_2p + b_3kp, \quad (2)$$

вид и параметры которой были установлены на основании обработки многолетних экспериментальных данных, полученных Всероссийским научно-исследовательским институтом генетики и разведения сельскохозяйственных животных (ВНИИГРЖ), филиалом ФГБНУ «Федеральный научный центр животноводства — ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста» (Санкт-Петербург — Пушкин).

При обосновании критерия оптимальности принятия решений по заготовке кормов (укосам) необходимо иметь в виду, что целью всей системы кормозаготовки является **получение заданной урожайности травостоя с заданными параметрами качества**. С учётом ранее принятых обозначений, формализованный вариант критерия $I(T)$, использующий показатель переваримости кормов, имеет следующий вид:

$$I(T) = g_1 (m(T) - m^*)^2 + g_2 (\pi(k, p|T) - \pi^*(k, p))^2, \quad (3)$$

где $m(T)$, m^* — прогнозные и заданные значения величины биомассы травостоя (урожайности), кг/м²; $\pi(k, p|T)$, $\pi^*(k, p)$ — прогнозные и заданные значения показателя переваримости биомассы травостоя, являющегося функцией от процентного содержания в сухом веществе клетчатки и протеина; g_1 , g_2 — весовые множители, посредством которых устанавливается требуемый баланс между массовыми и качественными компонентами критерия и его безразмерный характер.

Критерий (3) имеет явно выраженный минимум, что соответствует балансу его компонентов, т.е. отражает компромисс между количеством и качеством убираемой биомассы. Тогда решающее правило о сроках заготовки кормов с учётом баланса составляющих критерия выглядит следующим образом: «если $I(T) \leq \delta$, то проведение укоса, если $I(T) > \delta$, то **продолжить вегетацию**». Для оценивания параметров состояния травостоя, входящих в критерий (3), нам необходимы математические модели, отражающие динамику величины биомассы и её качественных показателей, а также модели, отражающие связь параметров состояния биомассы с параметрами оптического отражения в системах ДЗЗ.

На *рис. 1* показаны графики, иллюстрирующие суть решаемой проблемы. Здесь представлено три межукосных периода вегетации многолетних трав, из которых видно, что одновременно с увеличением величины биомассы травостоя m показатель переваримости получаемых кормов π снижается. Поэтому моменты времени проведения укосов T_1 , T_2 , T_3 как раз и представляют собой оптимальные решения агрономической службы.

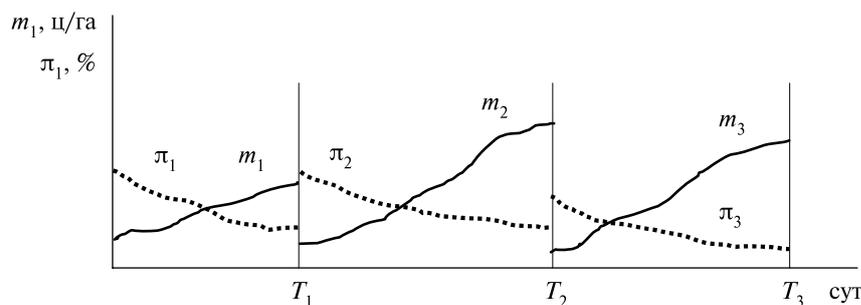


Рис. 1. Динамика накопления биомассы m и снижения показателя переваримости кормов из многолетних трав

Как видно из выражений (1), (2) показателей качества и графиков на *рис. 1*, для решения задачи необходимо строить прогнозы изменения величины биомассы и показателей качества на основании доступных измерений, как прямых, так и косвенных, используя такое современное высокопроизводительное средство измерения, как дистанционное зондирование Земли. При этом необходимо иметь в виду, что в отличие от величины биомассы использование данных ДЗЗ для оценивания биохимических параметров биомассы пока невозможно в связи с тем, что по отношению к ним ещё не доказана информативность параметров оптического отражения по всему диапазону, используемому в современных системах дистанционного зондирования.

Исходя из вышеуказанных особенностей оценивания, сформулируем основные требования к математической модели параметров состояния травостоя:

- возможность формирования оценок параметров состояния травостоя в реальном времени, позволяющих рассчитывать требуемые массовые и качественные показатели кормов;
- возможность учёта технологических воздействий и климатических возмущений;
- обеспечение требуемых прогностических свойств, позволяющих принимать упреждающие решения о датах проведения укосов.

В настоящее время в европейских странах развивается специализированное направление моделирования состояния травостоя. Так, широкое распространение получила GrazeGro — Европейская модель роста травостоя для прогноза продуктивности пастбищ многолетних трав для принятия решений (Hill, Carey, 1997; Jouven et al., 2006). Она была разработана для решения различного рода задач управления пастбищами в системах производства молока в Северо-Западной Европе. Модель GrazeGro, по сути дела, развивает известную модель LINGRA (LINtul-GRAss) (Harmony et al., 1997; Sanderson et al., 2001). Эта модель является чисто эмпирической, и с её помощью возможны прогнозы продуктивности пастбищ на достаточно большой площади или ареале. Опыт практической эксплуатации GrazeGro показал, что для получения локальных оценок для конкретного поля требуется дальнейшее уточнение с использованием контрольной информации с лугов с известным состоянием травостоя. В силу отсутствия обратной связи по состоянию реального объекта управления данная модель не может обеспечить точность прогнозирования, достаточную для принятия решений по заготовке кормов.

В настоящей работе развивается идентификационный подход к математическому моделированию, основной особенностью которого является существенное уменьшение неопределённостей разного рода (Михайленко и др., 2009). Они связаны с невозможностью точного определения значения параметров в математических моделях известной структуры, с априорной неизвестностью самой структуры модели, наличием случайных возмущений параметров, наличием ошибок измерений состояний объектов исследований, воздействием на изучаемые явления случайных внешних возмущений. Для решения таких задач всегда требуется экспериментальная информация, объём которой зависит от рода неопределённостей и класса решаемой задачи. Этот подход предполагает использование двух основных процедур идентификации: 1) предварительного выбора структуры и вида модели объекта; 2) последующего оценивания параметров модели по экспериментальной информации. В зависимости от класса задач и возможностей получения экспериментальной информации эти процедуры могут повторяться неоднократно. Здесь состояние объекта моделирования, которым является система «почва — растение — атмосфера», измеряется в процессе проведения идентификационного эксперимента, и полученная информация хранится в БД.

Для решения поставленной задачи мы используем два основных звена: блок структуры биомассы и блок её качественных показателей. При этом каждый из блоков имеет следующий канонический векторно-матричный вид:

— блок структуры биомассы в развёрнутой форме (Михайленко, Курашвили, 2003, 2004, 2008; Михайленко и др., 2009):

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1M} \\ \dot{x}_{2M} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_M \begin{bmatrix} x(t)_{1M} \\ x(t)_{2M} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}_M \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}_M \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}, \\ t &\in (T_i, T_{i+1}), \\ \begin{bmatrix} x_{1M}(0) \\ x_{2M}(0) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_M \begin{bmatrix} w_1(0) \\ w_2(0) \\ w_3(0) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} y_{1M}(t) \\ y_{2M}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{100}{y_{1M}(t)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1M}(t) \\ x_{2M}(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

или в символической векторно-матричной форме:

$$\dot{X}_M = A_M X_M + C_M F(t) + B_M U(t), \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} X_M(0) &= D_{M1} W(0), \\ Y_M(0) &= H_M X_M(t); \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

— блок качественных показателей биомассы в развёрнутой форме (Михайленко, Курашвили, 2003, 2004, 2008):

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1K} \\ \dot{x}_{2K} \\ \dot{x}_{3K} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_K \begin{bmatrix} x(t)_{1K} \\ x(t)_{2K} \\ x(t)_{3K} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}_K \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}_K \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}, \\ t &\in (T_i, T_{i+1}), \\ \begin{bmatrix} x_{1K}(0) \\ x_{2K}(0) \\ x_{3K}(0) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}_K \begin{bmatrix} w_1(0) \\ w_2(0) \\ w_3(0) \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} y_{1K}(t) \\ y_{2K}(t) \\ y_{3K}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{100}{y_{1M}(t)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{100}{y_{1M}(t)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{100}{y_{1M}(t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1K}(t) \\ x_{2K}(t) \\ x_{3K}(t) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_{1K}(t) \\ x_{2K}(t) \\ x_{3K}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} [x_{1M}(t)],$$

или в символической векторно-матричной форме:

$$\dot{X}_K = A X_K + C_K F(t) + B_K U(t), \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} X_K(0) &= D_{K1} W(0), \\ Y_K(0) &= H_K X_K(t). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

В блоке структуры биомассы состояниями являются $x_{1м}$, $x_{2м}$ — сухая и сырая надземная масса растений, кг/м²; в блоке качественных показателей это $x_{1к}$, $x_{2к}$ и $x_{3к}$ — масса клетчатки, легкорастворимых углеводов и сырого протеина в сухой массе растений, кг/м². Внешние возмущения в обоих блоках: f_1 — среднесуточная температура воздушной среды, °С; f_2 — среднесуточный уровень радиации, Вт/(м²·ч); f_3 — среднесуточный уровень осадков, мм; f_4 — влагосодержание почвы. Возмущения начальных условий в обоих блоках модели: w_1 — содержание доступного азота в почве, г/кг; w_2 — содержание доступного калия, г/кг; w_3 — содержание доступного фосфора, г/кг. В качестве непосредственно наблюдаемых величин в блоке структуры биомассы были приняты: $y_{1м}$ — общая надземная биомасса растений, кг/м²; $y_{2м}$ — процентное содержание сухого вещества в общей биомассе; в блоке качественных показателей: $y_{1к}$, $y_{2к}$ и $y_{3к}$ — процентное содержание клетчатки, легкорастворимых углеводов и сырого протеина в сухом веществе соответственно. Факторами управления в моделях (4), (8) являются: u_1 — содержание в почве доступного азота, г/м²; u_2 — влагосодержание почвы, мм; следующие параметры модели структуры биомассы / модели блока качественных показателей биомассы: $a_{11,м}...a_{22,м} / a_{11,к}...a_{33,к}$ — динамические параметры, $c_{11,м}...c_{23,м} / c_{11,к}...c_{33,к}$ — параметры передачи внешних возмущений, $b_{11,м}...b_{22,м} / b_{11,к}...b_{22,к}$ — параметры передачи управлений, $d_{11,м}...d_{13,м} / d_{11,к}...d_{33,к}$ — параметры модели начальных условий, $X_м / X_к$ — вектор параметров состояния модели, $Y_м / Y_к$ — вектор наблюдаемых величин; $A_м, C_м, B_м, D_м / A_к, C_к, B_к, D_к$ — соответственно динамическая матрица, матрицы передачи возмущений, управлений и начальных условий в векторно-матричной форме; k_1, k_2, k_3 — параметры связи массовых и качественных параметров биомассы; F, U, W — общие для обоих блоков модели векторы внешних возмущений, управлений и возмущений начальных условий.

С учётом переменных приведённых моделей критерий принятия решений (3) будет иметь следующий вид:

$$I(T) = \left[(g_1(x_{1м}(T) + x_{2м}(T)) - m^*) \right]^2 + g_2 \left[\pi(y_{1к}, y_{3к} | T) - \pi^*(y_{1к}, y_{3к}) \right]^2. \tag{12}$$

Нам необходимо показать, каким образом осуществляется дистанционное зондирование посева многолетних трав. С точки зрения современной информационной теории, дистанционное зондирование сельскохозяйственных посевов характеризуется как задача восстановления информации о состоянии объекта по косвенным наблюдениям (Антонов, Сладких, 2009; Барталев и др., 2006; Михайленко, 2006). Здесь на основе закона отражения света от неоднородной шероховатой поверхности, в качестве которой может быть представлена поверхность посева, может использоваться следующая модель (в среднем по площади поля) (Рачкулик, Ситникова, 1981; Кочубей и др., 1990):

$$z_1 = p_1 e^{-p_2(x_{1м} + x_{2м})} + \xi_1, \tag{13}$$

$$z_2 = p_3 e^{-p_4 x_{2м}} + \xi_2, \tag{14}$$

где: z_1, z_2 — параметры отражения системы ДЗЗ в инфракрасном и видимом диапазонах; p_1-p_4 — параметры моделей; ξ_1, ξ_2 — случайные ошибки моделирования, имеющие нулевые средние значения и дисперсии d_1, d_2 .

Экспоненциальная форма моделей ДЗЗ (13), (14) неустойчива к процедуре идентификации, поэтому целесообразно разложить экспоненциальные функции в степенные ряды:

$$z_1 = p_{11} + p_{12}x_{1м} + p_{13}x_{2м} + p_{14}x_{1м}^2 + p_{15}x_{2м}^2 + p_{16}x_{1м}^3 + p_{17}x_{2м}^3 + \xi_1, \tag{15}$$

$$z_2 = p_{21} + p_{22}x_{1м} + p_{23}x_{2м} + p_{24}x_{1м}^2 + p_{25}x_{2м}^2 + p_{26}x_{1м}^3 + p_{27}x_{2м}^3 + \xi_2, \tag{16}$$

вводя векторы

$$Z^T = [z_1 \quad z_2],$$

$$W^T(X_м) = \left[1 \quad x_{1м} \quad x_{2м} \quad x_{1м}^2 \quad x_{2м}^2 \quad x_{1м}^3 \quad x_{2м}^3 \right],$$

$$\Xi^T = [\xi_1 \quad \xi_2]$$

и матрицу параметров

$$P^T = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} & p_{17} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} & p_{27} \end{bmatrix},$$

преобразуем модель в векторно-матричной форме:

$$Z = W(P, X_M) + \Xi. \quad (17)$$

Таким образом, мы получили аналитическое представление критерия и решающего правила принятия решений на его основе, а также математические модели, позволяющие оценивать и прогнозировать его величину.

Материалы и методы

Все рассматриваемые модели динамики массовых и качественных показателей (4)–(11), а также модели ДЗЗ (13)–(17) отражают средние по полю показатели, так как принимаемые решения о сроках заготовки относятся именно к средним значениям.

Наличие модели динамики биомассы травостоя (6) и модели оптических измерений ДЗЗ (17) позволяет строить оптимальные оценки структуры биомассы, используя методику оптимальной фильтрации (Михайленко, 2006, 2011; Михайленко, Курашвили, 2008; Mikhailenko, 2013):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{X}}_M &= A\hat{X}_M(t) + C_M F(t) + B_M U(t) + R(t) \frac{\partial W^T(P, \hat{X}_M)}{\partial \hat{X}_M} S^{-1} (Z(t) - W(\hat{X}_M)), \\ \dot{R} &= R(t) A_M^T + A_M R(t) - R(t) \frac{\partial W^T(P, \hat{X}_M)}{\partial \hat{X}_M} S^{-1} \frac{\partial W(P, \hat{X}_M)}{\partial \hat{X}_M} R(t), \\ \hat{X}_M(0) &= \hat{X}_{0M}, \quad P(0) = \text{cov}[\hat{X}_{0M}], \quad S = \text{cov}[\Xi], \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где \hat{X}_M — оптимальная средняя по площади поля оценка вектора параметров состояния биомассы травостоя; R — матрица ковариаций априорных ошибок оценивания; $\text{cov}[\hat{X}_{0M}]$ — матрица ковариаций начальных условий в модели динамики состояния биомассы травостоя; $\text{cov}[\Xi]$ — матрица ковариаций ошибок измерения оптических параметров.

Для реализации алгоритма (18), являющегося центральным информационным ядром всей системы поддержки принятия решений о сроках уборки многолетних трав, необходимы наземные измерения химического состояния почвы (вектор управления $U(t)$), внешних метеоусловий (вектор $F(t)$), начальных условий (вектор \hat{X}_{0M}) и данных ДЗЗ (вектор $Z(t)$). Посредством этой процедуры осуществляется комплексирование наземной измерительной информации и данных ДЗЗ. Поэтому именно модель структуры биомассы (6) является базовой во всей системе мониторинга, так как именно на её основе посредством алгоритма оптимальной фильтрации осуществляется оценивание состояния посевов многолетних трав по данным дистанционного зондирования. Модель качественных показателей биомассы (10) является вспомогательной, так как позволяет оценивать и прогнозировать критерий принятия решений о дате заготовки кормов (12). В этой модели оценки показателей качества биомассы строятся по оценкам структуры биомассы посредством соотношений (9), отражающих связь этих показателей с массовыми параметрами и наблюдаемыми переменными модели структуры биомассы (4)–(7). Однако все эти процедуры возможны только при известных параметрах всех моделей, т.е. при выполнении процедуры их идентификации и последующей подстройки к изменяющимся условиям вегетации посева.

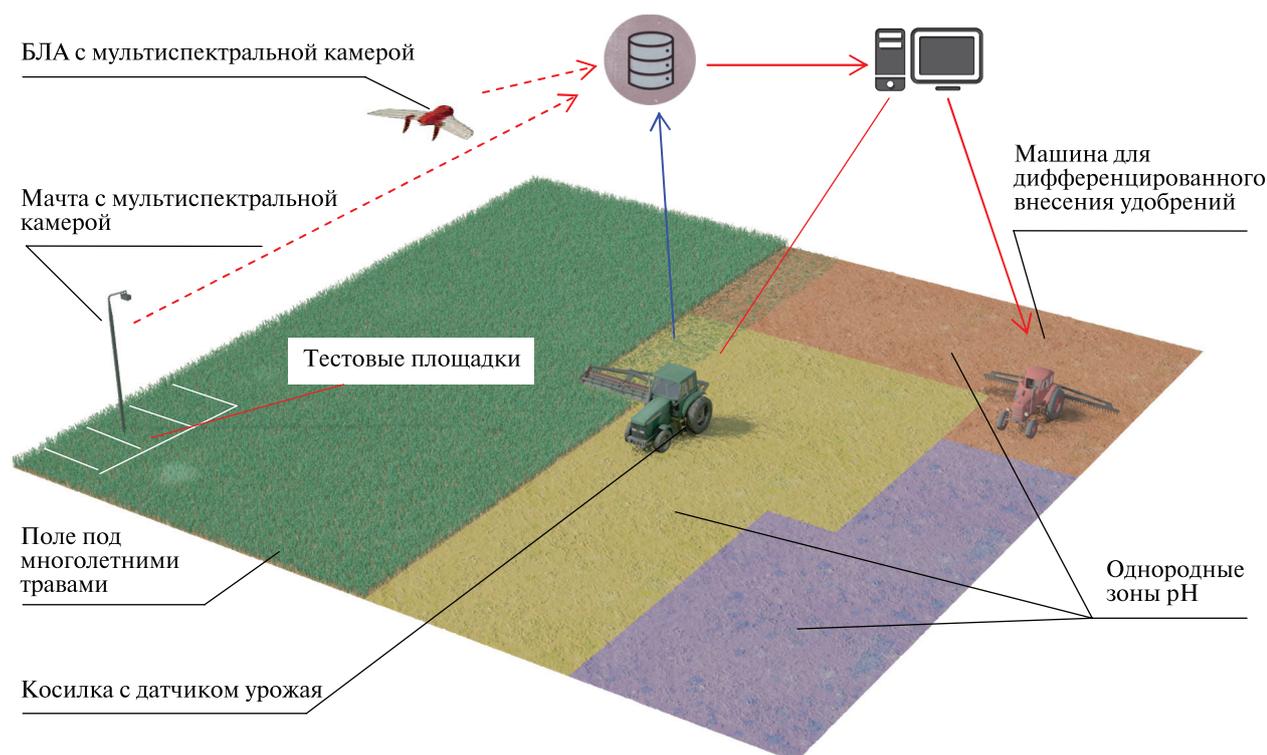


Рис. 2. Схема получения данных ДЗЗ и наземных измерений состояния посевов в режиме on-line

На рис. 2 отражена методика получения информации о состоянии посева многолетних трав, используемая для идентификации математических моделей и их адаптации в реальном времени. Здесь на основном поле с многолетними травами выделяются тестовые площадки, число которых составляет 10–15, а площадь одной площадки равна 20–25 м². Так как тестовые площадки являются частью основного поля, они имеют такие же физические характеристики почв и на них посеяны такие же многолетние травы, как и на основном поле. Различия между самими площадками и основным полем заключаются в разных дозах внесения минеральных удобрений и разном увлажнении почвы на этих площадках. Над тестовыми площадками установлена мачта с камерой приземного дистанционного зондирования, которая является источником информации о состоянии посевов в реальном времени. При этом камера имеет два оптических канала (видимый и инфракрасный), что позволило с достаточной точностью и надёжностью решать задачу оценивания параметров биомассы травостоя многолетних трав. Аналогичной камерой в настоящее время оборудованы и беспилотные летательные аппараты, используемые нами в системе мониторинга сельскохозяйственных полей. Такая же информация доступна и на отечественных спутниковых системах мониторинга («Ресурс» и «Ресурс-П»).

Путём периодического (два раза в неделю) отбора проб растений и почвы с тестовых площадок оценивают параметры динамических моделей структуры биомассы и её качественных показателей (4)–(11). Различия в величинах управляющих воздействий позволяют применить метод идентификации, основанный на пробном воздействии на объект исследования. При этом параметры моделей уточняются с каждым новым измерением, что обеспечивает их адаптацию к изменяющимся условиям. На рис. 3, 4 приведены графики примера процесса идентификации этих моделей.

Одновременно на основании периодического отбора проб растений с тестовых площадок и данных приземного дистанционного зондирования посевов на тестовых площадках оценивают параметры модели системы ДЗЗ (17). На рис. 5 приведены графики примера процесса идентификации этой модели по двум рабочим каналам — красному и инфракрасному.

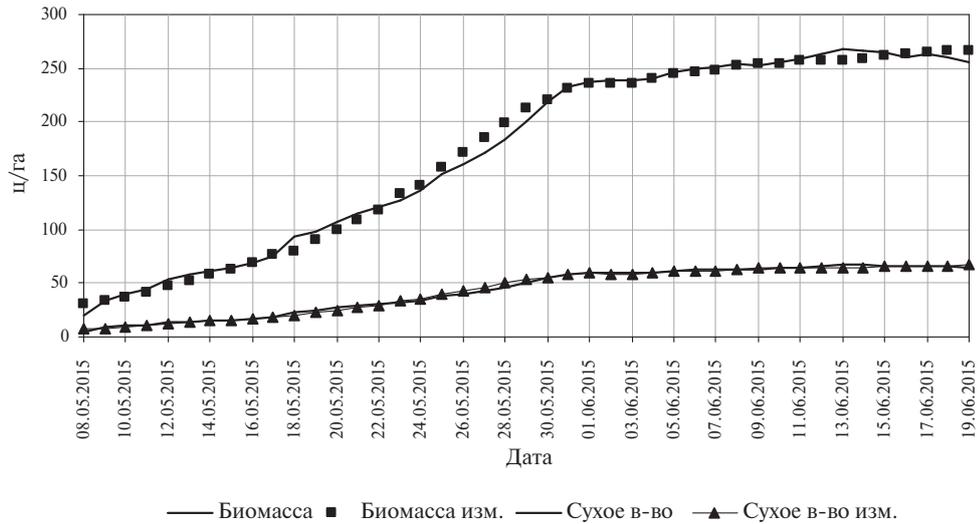


Рис. 3. Процесс идентификации математической модели структуры биомассы травостоя

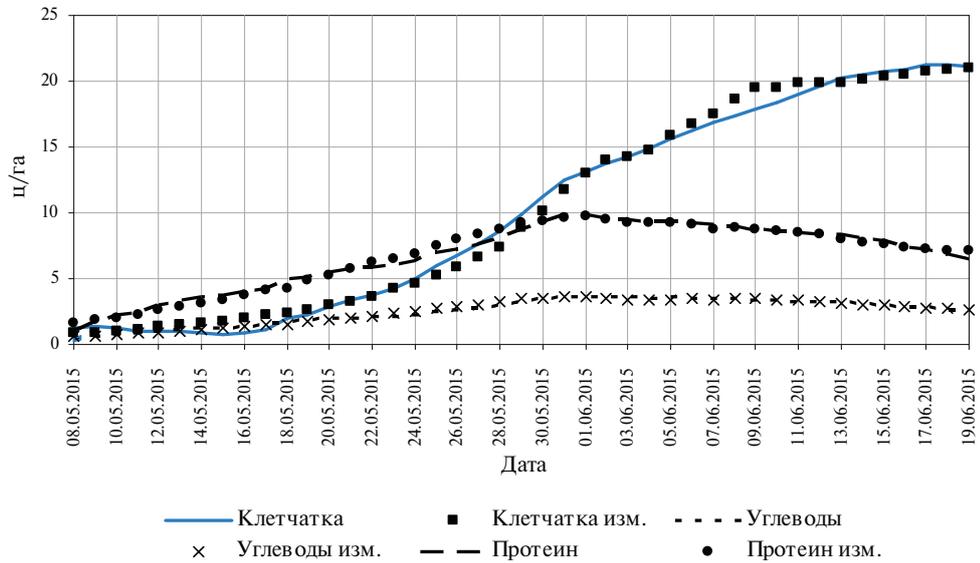


Рис. 4. Процесс идентификации математической модели показателей качества биомассы

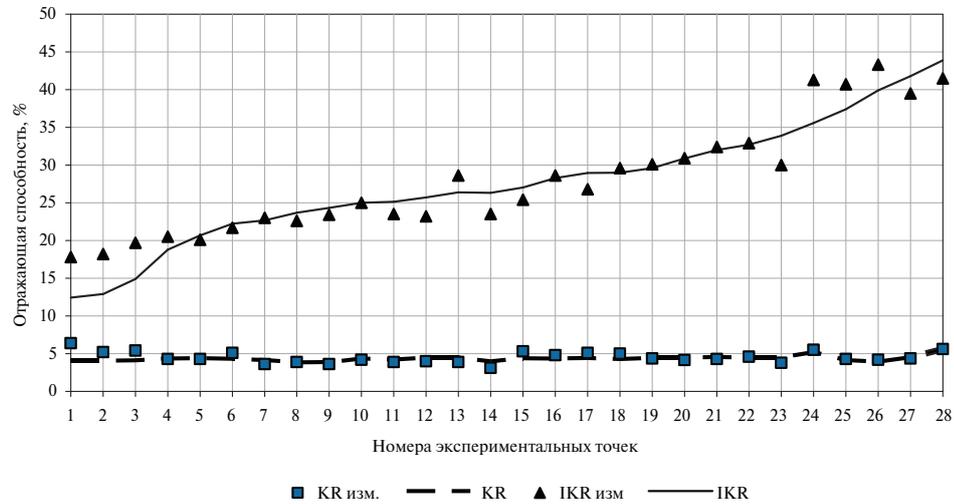


Рис. 5. Процесс идентификации математической модели каналов ДЗЗ

Среднеквадратическая ошибка идентификации моделей состояния посевов и каналов ДЗЗ не превышает 10% от максимального значения моделируемого параметра, что является хорошей исходной базой для решения последующих задач оценивания и прогнозирования. Кроме того, следует отметить, что периодический отбор проб с одновременными сопоставительными измерениями моделируемых величин позволяют адаптировать параметры моделей к изменяющимся условиям и стабилизировать уровень ошибок моделирования на уровне, не превышающем $\pm 10\%$.

Один тип почв, единство возделываемой культуры и одни и те же климатические условия позволяют распространить параметры идентифицируемых математических моделей средних параметров состояния посева не только на тестовые площадки, но и на всё основное поле. Такое допущение и позволяет реализовать базовый алгоритм оптимального оценивания (18). Естественно, что тестовые площадки должны выделяться отдельно на каждой возделываемой культуре и на каждом типе почвы. При этом камера ДЗЗ для тестовых измерений может быть переносной, или для этих целей могут использоваться беспилотные летательные аппараты, как это показано на *рис. 2*.

После проведения 5–6 первых шагов идентификации математических моделей осуществляют переход к режиму принятия решений. Для этого посредством системы ДЗЗ, базирующейся на беспилотном или космическом летательном аппарате (см. *рис. 2*), в момент времени t осуществляют съёмку посева травостоя на основном поле, для которого необходимо принимать решение о дате уборки. В результате формируют среднее по площади поля значение вектора показателей отражения $Z(t)$, на основании которого посредством алгоритма (18) строится средний по полю вектор оценок параметров биомассы $\hat{X}_M(t)$, принимаемый в качестве начальных условий для краткосрочного (на 2–5 сут) прогнозирования состояния биомассы. П посредством соотношений (9) связи массовых и качественных показателей травостоя определяются начальные условия для прогнозирования параметров $\hat{y}_{1к}(t)$, $\hat{y}_{2к}(t)$, $\hat{y}_{3к}(t)$ и $\hat{x}_{1к}(t)$, $\hat{x}_{2к}(t)$, $\hat{x}_{3к}(t)$. На *рис. 6* представлен процесс оценивания параметров состояния биомассы по данным ДЗЗ. Здесь, как и при идентификации математических моделей, величина ошибок оценивания не превышает 10%-й уровень.

Посредством моделей (6), (10) прогнозируют состояние биомассы и её качественных показателей, а также значения критерия (12) до тех пор, пока не будет выполнено условие $I(T) \leq \delta$ (проведение укоса). На *рис. 7* представлен график прогнозных значений критерия (12), где датой принятия решения о проведении укоса являются 14-е сутки с начала первого межукосного периода вегетации многолетних трав.

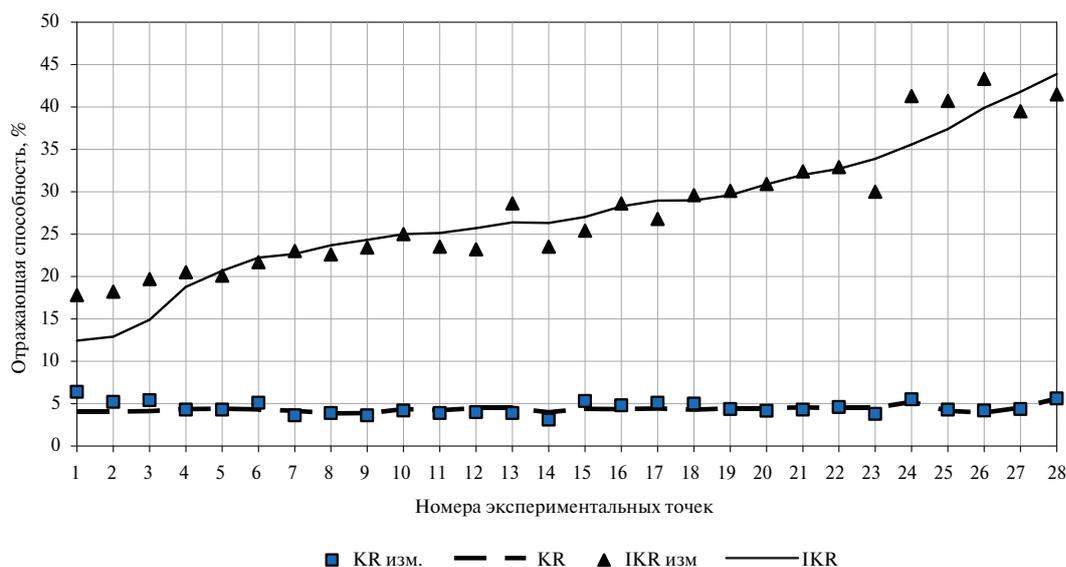


Рис. 6. Процесс оценивания параметров структуры биомассы травостоя по данным ДЗЗ

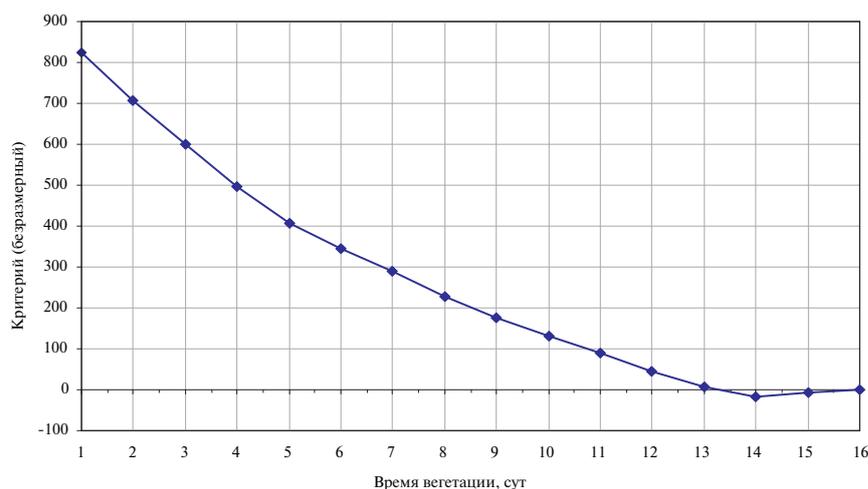


Рис. 7. Прогнозирования критерия принятия решения о дате уборки биомассы трав

При этом заданное значение урожайности биомассы составляет 150 ц/га, а заданное значение показателя переваримости — 89%. Прогнозные значения для решения о дате укоса: урожайность биомассы — 148 ц/г, показатель переваримости — 85%. Весовые множители критерия принятия решений составляли: $g_1 = 0,07$; $g_2 = 3,0$.

Выводы

Принятие решений о датах укосов посева многолетних трав возможно на основе критерия, представляющего собой взвешенную сумму квадратов отклонений от заданных значений величины биомассы посева и её качества в виде показателя переваримости. Для формирования текущих оценок значений критерия и его прогнозов используются динамические модели структуры биомассы и показателей её качества, а также модель показателей оптического отражения средств дистанционного зондирования Земли. Для оперативного оценивания параметров всех математических моделей используются наземные измерения состояния посевов в виде периодического отбора проб с тестовых площадок с аналогичным посевом, выделенных на основном поле, и данные приземного дистанционного зондирования от стационарных средств, которыми оборудуются тестовые площадки. Оценивание состояния посевов на основном поле осуществляется на базе комплексирования информации используемых математических моделей и данных дистанционного зондирования от средств спутникового или авиационного базирования, которое осуществляется с периодичностью отбора проб с тестовых площадок. При этом для оценивания параметров состояния посевов на основном поле используются данные ДЗЗ его поверхности, а с тестовых площадок в алгоритм оценивания переносятся только параметры используемых математических моделей. Основанием для такого переноса является единство параметров почвы, общая культура и общие климатические условия возделывания на тестовых площадках и основном поле.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ (проект № 18-016-00008).

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., Лупан Е. А., Нейштадт И. А., Савин И. Ю. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.

3. *Кочубей С. М., Шадчина Т. М., Кобец Н. И.* Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. Киев: Наукова думка, 1990. 134 с.
4. *Михайленко И. М.* Управление процессом силосования кормов из многолетних трав // Доклады РАСХН. 2006. № 3. С. 66–68.
5. *Михайленко И. М.* Основные задачи оценивания состояния посевов и почвенной среды по данным космического зондирования // Экологические системы и приборы. 2011. № 8. С. 17–25.
6. *Михайленко И. М., Курашвили А. Е.* Управление качеством кормов из многолетних трав // Международная конференция «Информационные технологии, информационные измерительные системы и приборы в исследовании сельскохозяйственных процессов»: сб. трудов. Новосибирск. 2003. С. 106–115.
7. *Михайленко И. М., Курашвили А. Е.* Система мониторинга состояния многолетних трав в Ленинградской области // Сельскохозяйственные вести. 2004. № 3 (58). С. 24–27.
8. *Михайленко И. М., Курашвили А. Е.* Прогнозирование состояния травостоя в системе управления качеством кормов в молочном животноводстве // Вестник РСХА. 2008. № 2. С. 10–13.
9. *Михайленко И. М., Тимошин В. Н., Данилова Т. Н.* Математическое моделирование системы «почва – растение – атмосфера» на примере многолетних трав // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2009. № 4. С. 61–64.
10. *Рачкулик В. И., Ситникова М. В.* Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 287 с.
11. *Черепанов А. С.* Вегетационные индексы: справочные материалы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
12. *Шагиев Б. Р., Рогова Т. В., Савельев А. А.* Использование вегетационных индексов как суррогатных факторов для разработки региональной экологической шкалы плодородия почв // Вестник Удмуртского университета: Биология. Науки о земле. 2011. Вып. 4. С. 21–30.
13. *Crippen R. E.* Calculating the Vegetation Index Faster // Remote Sensing of Environment. 1990. V. 34. P. 71–73.
14. *Harmony K. R., Moore K. J., George I. R.* Determination of pasture biomass using four indirect methods // Agronomy J. 1997. V. 89. P. 665–672.
15. *Hill M. O., Carey P. D.* Prediction of yield in the Rothamsted Park Grass Experiment by Ellenberg indicator values // J. Vegetation Science. 1997. V. 8. P. 579–586.
16. *Jordan C. F.* Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor // Ecology. 1969. V. 50. P. 663–666.
17. *Jouven M., Carrère P., Baumont R.* Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description // Grass and Forage Science. 2006. V. 61. Iss. 2. P. 112–124.
18. *Kriegler F. J., Malila W. A., Nalepka R. F., Richardson W.* Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition // Proc. 6th Intern. Symp. Remote Sensing of Environment. University of Michigan, Ann Arbor, USA, 1969. P. 97–131.
19. *Lawrence R.* Comparisons among vegetation indices and bandwise regression in a highly disturbed, heterogeneous landscape: Mount St. Helens, Washington // Remote Sensing of Environment. 1998. V. 64. P. 91–102.
20. *Lillesand T. M., Kiefer R. W.* Remote sensing and image interpretation. 2nd ed. N. Y.: John Wiley and Sons, 1987. 721 p.
21. *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. 41–52.
22. *Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS // Proc. 3rd ERTS-1 Symp. NASA SP-351. Washington DC, 1973. V. 1. P. 309–317.
23. *Sanderson M. A., Rotz C. A., Fultz S. W., Rauburn E. B.* Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler // Agronomy J. 2001. V. 93. P. 1281–1286.

Decision-making on the date of fodder harvesting based on remote sensing data of the Earth and mathematically tuned models

I. M. Mikhaylenko, V. N. Timoshin, V. D. Malygin

Agrophysical Research Institute, St. Petersburg 195220, Russia
E-mails: ilya.mihailenko@yandex.ru, timoshinv@yandex.ru, vitsimf1@gmail.com

Scientific and methodological basis for the decision making system of the harvesting date made by the agronomic service on the basis of remote sensing data and ground measurements are presented. The task is completed on the example of perennial grass, which is a raw material for dairy cattle fodder. The essence of the decision is to find a compromise between the quantity and the quality of the harvested biomass. It corresponds to a minimum of the criterion, which is a weighted sum of squares of deviations from the given values of the yield of biomass and the index of its digestibility. To predict the criterion, dynamic models of biomass state parameters and indices of its quality are proposed. Current assessment of biomass state parameters is based on the remote sensing data. An optimal filtering algorithm based on dynamic models of biomass state parameters and supplemented by the optical measurement model is used for the data processing. At the same time, current estimates of the biomass state parameters become the initial conditions for predicting the criterion of decision on the date of harvesting.

Keywords: decisions on the date of harvesting, remote sensing data of the Earth, mathematical models, optimal estimations, biomass quality indicators of perennial grasses

Accepted: 31.12.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-169-182

References

1. Antonov V. N., Sladkikh L. A., Monitoring sostoyaniya posevov i prognozirovaniye urozhaynosti yarovoy pshenitsy po dannym DZZ (Monitoring of the state of crops and forecasting the yield of spring wheat according to remote sensing data), *Geomatika*, 2009, No. 4, pp. 50–53.
2. Bartalev S. A., Loupian E. A., Neishtadt I. A., Savin I. Yu., Klassifikatsiya nekotorykh tipov sel'skokhozyaystvennykh posevov v yuzhnykh regionakh Rossii po sputnikovym dannym MODIS (Classification of some types of agricultural crops in southern regions of Russia according to MODIS satellite data), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 3, pp. 68–75.
3. Kochubey S. M., Shadchina T. M., Kobets N. I., *Spektral'nyye svoystva rasteniy kak osnova metodov distantsionnoy diagnostiki* (Spectral properties of plants as a basis for remote diagnostic methods), Kiyev: Naukova dumka, 1990, 134 p.
4. Mikhaylenko I. M., Upravleniye protsessom silosovaniya kormov iz mnogoletnikh trav (Management of silage forage from perennial grasses), *Doklady RASKHN*, 2006, No. 3, pp. 66–68.
5. Mikhaylenko I. M., Osnovnyye zadachi otsenivaniya sostoyaniya posevov i pochvennoy sredy po dannym kosmicheskogo zondirovaniya (The main tasks of assessing the state of crops and soil environment from space probing data), *Ekologicheskiye sistemy i pribory*, 2011, No. 8, pp. 17–25.
6. Mikhaylenko I. M., Kurashvili A. Ye., Upravleniye kachestvom kormov iz mnogoletnikh trav (Management of quality of forages from perennial grasses), *Informatsionnyye tekhnologii, informatsionnyye izmeritel'nyye sistemy i pribory v issledovanii selskhozjastvennykh protsessov* (Information technologies, information measuring systems and devices in the study of agricultural processes), Proc. Intern. Conf., Novosibirsk, 2003, pp. 106–115.
7. Mikhaylenko I. M., Kurashvili A. Ye., Sistema monitoringa sostoyaniya mnogoletnikh trav v Leningradskoy oblasti (System for monitoring the condition of perennial grasses in the Leningrad Region), *Sel'skokhozyaystvennyye vesti*, 2004, No. 3 (58), pp. 24–27.
8. Mikhaylenko I. M., Kurashvili A. Ye., Prognozirovaniye sostoyaniya travostoya v sisteme upravleniya kachestvom kormov v molochnom zhivotnovodstve (Forecasting the condition of the grass stand in the feed quality management system in dairy cattle breeding), *Vestnik RSKHA*, 2008, No. 2, pp. 10–13.
9. Mikhaylenko I. M., Timoshin V. N., Danilova T. N., Matematicheskoye modelirovaniye sistemy "pochva – rasteniye – atmosfera" na primere mnogoletnikh trav (Mathematical modeling of the soil-plant-atmosphere

- system using the example of perennial grasses), *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*, 2009, No. 4, pp. 61–64.
10. Rachkulik V. I., Sitnikova M. V., *Otrazhatel'nyye svoystva i sostoyaniye rastitel'nogo pokrova* (Reflective properties and state of vegetation cover), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 287 p.
 11. Cherepanov A. S., *Vegetatsionnyye indeksy: spravochnyye materialy* (Vegetation indices: reference materials), *Geomatika*, 2011, No. 2, pp. 98–102.
 12. Shagiyeu B. R., Rogova T. V., Savel'yev A. A., *Ispol'zovaniye vegetatsionnykh indeksov kak surrogatnykh faktorov dlya razrabotki regional'noy ekologicheskoy shkaly plodorodiya pochv* (Use of vegetative indices as surrogate factors for the development of a regional ecological scale of soil fertility), *Vestnik Udmurtskogo universiteta: Biologiya. Nauki o zemle*, 2011, Issue 4, pp. 21–30.
 13. Crippen R. E., *Calculating the Vegetation Index Faster*, *Remote Sensing of Environment*, 1990, Vol. 34, pp. 71–73.
 14. Harmoney K. R., Moore K. J., George I. R., *Determination of pasture biomass using four indirect methods*, *Agronomy Journal*, 1997, Vol. 89, pp. 665–672.
 15. Hill M. O., Carey P. D., *Prediction of yield in the Rothamsted Park Grass Experiment by Ellenberg indicator values*, *Journal of Vegetation Science*, 1997, Vol. 8, pp. 579–586.
 16. Jordan C. F., *Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor*, *Ecology*, 1969, Vol. 50, pp. 663–666.
 17. Jouven M., Carrère P., Baumont R., *Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description*, *Grass & Forage Science*, 2006, Vol. 61, Issue 2, pp. 112–124.
 18. Kriegler F. J., Malila W. A., Nalepka R. F., Richardson W., *Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition*, In: *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, University of Michigan, 1969, Ann Arbor, MI, pp. 97–131.
 19. Lawrence R., *Comparisons among Vegetation Indices and Bandwise Regression in a Highly Disturbed, Heterogeneous Landscape: Mount St. Helens, Washington*, *Remote Sensing of Environment*, 1998, Vol. 64, pp. 91–102.
 20. Lillesand T. M., Kiefer R. W., *Remote Sensing and Image Interpretation. 2nd edition*, New York: John Wiley and Sons, 1987, 721 p.
 21. Mikhailenko I. M., *Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data*, *International Journal of Information Technology & Operations Management*, 2013, Vol. 1, No. 5, pp. 41–52.
 22. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS*, *Proc. Third ERTS-1 Symp.*, NASA SP-351, Washington DC, 1973, Vol. 1, pp. 309–317.
 23. Sanderson M. A., Rotz C. A., Fultz S. W., Rauburn E. B., *Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler*, *Agronomy Journal*, 2001, Vol. 93, pp. 1281–1286.