

Управление сроками сева по данным дистанционного зондирования Земли

И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин

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

Представлены научно-методические основы принятия одного из наиболее важных решений, принимаемых агрономической службой, — решения о сроках проведения весеннего сева сельскохозяйственных культур. Для этого используются спутниковые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) по температуре и влажности верхнего слоя почвы (спутники серий NOAA, MetOp) и MODIS (спутники EOS-Aqua, Terra), а также наземные измерения этих параметров на метеопунтах. При этом решение принимается на основе критерия, в качестве которого используются прогнозы показателя всхожести посевов сельскохозяйственных культур. Для построения таких прогнозов используется динамическая модель температуры и влажности верхнего слоя почвы и модель показателя всхожести. Обеспечение высокой точности оценивания и прогнозов температуры и влажности почвы достигается использованием алгоритма оптимальной фильтрации, который реализуется путем комплексирования наземных измерений и данных ДЗЗ. За счет этого алгоритма уменьшается среднеквадратическая ошибка оценок температуры и влажности почвы до уровня $\pm 5\%$. При этом сами оптимальные оценки температуры и влажности служат начальными условиями для прогнозирования критерия принятия решений о сроках проведения сева сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: решения о сроках сева, данные дистанционного зондирования Земли, математические модели, оптимальные оценки, показатель всхожести посевов

*Одобрена к печати: 25.09.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-149-160*

Введение

Решение о проведении весеннего сева культур всегда принимается на основе информации о параметрах состояния почвы, среди которых наиболее важными являются ее температура и влажность, или влагозапас почвы в корнеобитаемом слое. В это время года поверхность почвенного покрова свободна от посевов сельскохозяйственных культур, что позволяет использовать данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для оценивания температуры и влажности. Эти данные формируются космическими летательными аппаратами (Кондратьев, Тимофеев, 1970, 1978; Музылев и др., 2005; Соловьев, Успенский, 2009, 2010; Barton, 1995; Becker, 1987; Becker, Li, 1990). Разработка методов дистанционного восстановления температуры поверхности почвы по данным измерений многоканальных радиометров AVHRR (спутники серий NOAA), MetOp и MODIS (спутники EOS-Aqua, Terra) ведется современными отечественными исследователями уже более 20 лет (Быховец и др., 2007; Соловьев, Успенский, Успенский, 2009; Сутовский, Успенский, 1996; Успенский, 1992). В настоящее время одними из основных инструментов для расчета вертикальных потоков влаги и тепла с покрытых растительностью участков поверхности являются разработанные с разной степенью детальности модели вертикального тепло- и влагопереноса в системе «почва-растительность-атмосфера» (SVAT). Посредством программ, разработанных на основе этих моделей, осуществляется тематическая обработка данных радиометров AVHRR/NOAA и MODIS/Terra, и пользователь имеет возможность получения оценок температуры поверхности почвы T_{sg} , не прибегая

к самостоятельной обработке спектральной информации. При этом относительная среднеквадратическая ошибка (СКО) такой оценки находится в пределах 10–25 % от среднесуточного значения температуры почвы для этого времени года (Успенский, 1992; Chevallier et al., 2000; Zlinszky et al., 2015).

Определение влажности почвы или ее влагозапаса также является одной из давно представляемых услуг спутниковыми мониторинговыми системами. Наибольший интерес представляет система метеонаблюдений США с использованием спутника MetOp, дополняемая наземной наблюдательной сетью AmeriFlux. В ней реализуются синхронные спутниковые и наземные измерения влажности почвы. Измерение влажности осуществляется как в относительных единицах (%), так и в объемных ($\text{м}^3/\text{м}^3$). В зависимости от вида и степени сухости местности относительная СКО оценок влажности находится в пределах 10–50% от среднесуточного значения влажности почвы для этого времени года (Chevallier et al., 2000; Zlinszky et al., 2015).

Ввиду достаточно больших ошибок прямое использование спутниковых оценок температуры и влажности почвы для принятия решений о сроках сева может привести к большим рискам потерь урожая. Поэтому актуально более точное оценивание этих параметров с использованием наземных измерений, чему и посвящена данная работа.

Постановка задачи

В отличие от задач оптимального оценивания состояния посевов сельскохозяйственных культур по данным ДЗЗ (Михайленко, 2011; Михайленко, Курашвили, 2008; Михайленко, Полуэктов, Якушев, 2004; Mikhailenko, 2013), здесь не требуется модель оптического измерения, так как спутниковая система мониторинга сама предоставляет оценки температуры и влажности почвы (Успенский, 1992; Barton, 1995; Chevallier et al., 2015). Для уменьшения ошибок, т. е. получения оптимальных оценок с учетом наземных измерений, нам потребуется динамическая модель для указанных параметров состояния почвы:

$$\begin{bmatrix} \dot{\vartheta} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{22} \\ a_{21} & a_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vartheta(t) \\ w(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \\ f_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \xi_2(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$t \in (0, T), \quad \vartheta(0) = \vartheta_0, \quad w(0) = w_0,$$

где: ϑ — средняя по площади поля температура поверхности почвы, °С; w — средняя по площади поля влажность поверхности почвы, %; f_1 — температура приземного слоя воздуха, °С; f_2 — уровень радиации окружающей среды, Вт/м²; f_3 — интенсивность выпадающих осадков, мм; f_4 — скорость ветра в приземном слое воздуха, м/с; t — время, сут; $(0, T)$ — интервал времени наблюдения; ξ_1, ξ_2 — случайные ошибки моделирования, имеющие нулевые

средние значения и ковариации $d_1, d_2, d_1 d_2$; $a_{11} \dots a_{22}$, $c_{11} \dots c_{23}$ — параметры модели, оцениваемые по экспериментальным данным, сут⁻¹.

Для реализации процедуры оптимального оценивания модель (1) мы должны дополнить спутниковой информацией ДЗЗ, представляющую собой косвенные оптические измерения состояния почвы, которые мы представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= \vartheta(t) + e_1(t), \\ y_2(t) &= w(t) + e_2(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где: y_1, y_2 — спутниковые данные ДЗЗ по температуре и влажности почвы; e_1, e_2 — случайные ошибки спутниковых оценок, имеющие нулевые средние и ковариации $\sigma_1, \sigma_1 \sigma_2, \sigma_{22}$.

Для удобства построения алгоритма оптимального оценивания и прогнозирования температурно-влажностного состояния почвы модели (1), (2) представим в канонической векторно-матричной форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z} &= AZ(t) + CF(t) + \Xi(t), \\ Y(t) &= Z(t) + E(t), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

здесь: $Z^T = [z_1 \ z_2]$ — вектор тепло-влажностного состояния почвы с компонентами $z_1 = \vartheta$, $z_2 = w$; T — индекс транспонирования векторов и матриц; $\dot{Z} = dZ/dt$ — производная вектора тепловлажностного состояния по времени; Ξ — вектор ошибок моделирования с ковариацией, $\text{cov}[\Xi] = D$; E — вектор ошибок спутникового оценивания с ковариацией, $\text{cov}[E] = S$; A — динамическая матрица модели; C — матрица передачи климатических возмущений; $Y^T = [y_1 \ y_2]$ — вектор оценок температуры и влажности верхнего слоя почвы, получаемых из спутниковой системы ДЗЗ.

С учетом принятых обозначений алгоритм оценивания температуры и влажности почвы по данным ДЗЗ выглядит следующим образом (де Гроот, 1974; Михайленко, 2011):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{Z}} &= A\hat{Z}(t) + CF(t) + R(t)S^{-1}(Y(t) - \hat{Z}) \\ \dot{R} &= D + R(t)A^T + AR(t) - R(t)S^{-1}R(t), \\ \hat{X}(0) &= M[X_0], \quad R(0) = \text{cov}[X_0], \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

здесь: \hat{Z} — оптимальная оценка вектора тепловлажностного состояния поверхности почвы; R — ковариационная матрица априорных ошибок оценивания.

На основании оценок (4) можно строить прогнозы тепло-влажностного состояния почвы на заданный интервал времени T относительно текущего момента времени t :

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}(T|t) &= AZ(T|t) + CF(T), \\ Z(t|t) &= \hat{Z}(t); \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $Z(t|t)$ — начальные условия прогнозирования, равные текущей оценке, формируемой системой (4) на основе данных ДЗЗ; $F(T)$ — прогнозы метеоусловий, полученные из системы Гидрометцентра РФ.

Решение о проведении весеннего сева должно приниматься одновременно по двум параметрам — температуре и влажности поверхностного слоя почвы. Самый простой возможный вариант заключается в выборе пороговых значений этих параметров, одновременное достижение которых и будет служить индикатором такого решения. Именно так и поступают агрономы в настоящее время. Однако, в силу коррелированности между собой этих параметров и влияния многих других неучтенных факторов, выбор вышеуказанных пороговых значений не является очевидным. Решение этой проблемы возможно двумя путями. В первом случае может использоваться математическая модель прорастания семян и фаз начального развития растений в посевах. На основе такой модели можно поставить и решить задачу оптимального выбора начальных условий процесса развития посева, обеспечивающих заданный урожай и заданную длительность периода вегетации посева. По своей сложности она будет эквивалентна задаче управления состоянием посева на всем вегетационном периоде. Во втором случае можно прибегнуть к интеллектуализации управления формированием решения на основе специального решающего правила, использующего для этого подходящий критерий. При этом такой критерий должен иметь физический смысл, быть непосредственно связанным с технологическим процессом и измеряемым (наблюдаемым) средствами ДЗЗ. Таким требованиям не отвечает широко распространенный гидротермический коэффициент, характеризующий уровень влагообеспеченности территории и определяемый как отношение суммы осадков за период с температурой, превышающей уровень $+10^\circ\text{C}$, к сумме значений температуры за это же время. Этот показатель является сугубо виртуальной экспертной оценкой параметров атмосферы и никак не связан с состоянием почвы и технологическим процессом. Величина этого параметра не может измеряться средствами ДЗЗ. Для принятия решений о сроках сева целесообразно использовать показатель полевой всхожести посевов, который является важным технологическим показателем и функционально зависит от сочетания температуры и влажности поверхностного слоя почвы. Этот показатель, как и температура и влажность верхнего слоя почвы, можно получать средствами ДЗЗ. Эти значения могут использоваться для уточнения параметров модели показателя всхожести, обозначаемого здесь как v .

В этом случае функция, используемая в решающем правиле, имеет следующий вид:

$$v = P^T \hat{Z}(T|t), \quad (6)$$

а решение о сроках проведения сева принимается следующим образом:

$$P^T \hat{Z}(T|t) \geq \delta \quad (\text{посев в момент } T), \quad (7)$$

$$P^T \hat{Z}(T|t) < \delta \quad (\text{нельзя сеять в момент } T), \quad (8)$$

где δ — заданное пороговое значение показателя всхожести (70–75%); T — заданный интервал прогнозирования относительно текущего момента времени t .

Выбор порогового значения показателя всхожести в указанных пределах, несмотря на то, что он может достигать больших значений, связан с необходимостью исключения возможных задержек со сроками сева. В этот период каждые сутки задержки сева приводят к сокращению периода вегетации и необратимым потерям урожая.

Материалы и методы

Основные научно-методические проблемы рассматриваемой задачи связаны с идентификацией используемых здесь математических моделей. Для этого используются точные наземные измерения температуры и влажности почвы, что возможно на ограниченном числе точек. Такими точками являются тестовые площадки, расположенные рядом с основным полем, площадь каждой из них составляет 20–30 м², а общее их количество — 10–12. Тестовые площадки оборудуются стационарными измерителями температуры и влажности поверхностного слоя почвы. На основании этих измерений оцениваются параметры $a_{11} \dots a_{22}$, $c_{11} \dots c_{23}$ модели (1) или матриц A , C модели (3). Такое оценивание достигается реализацией следующей процедуры минимизации:

$$A, C = \arg \min_{A, C} \left[(X(t) - Z(t))^T (X(t) - Z(t)) \right], \quad (9)$$

где $X^T = [\vartheta \ w]$ — вектор наземных измерений температуры и влажности поверхностного слоя почвы, полученный в результате осреднения по всем тестовым площадкам.

В табл. 1 приведен фрагмент экспериментальных данных, использованных для оценивания параметров модели (1).

Таблица 1. Фрагмент экспериментальных данных для оценивания параметров модели (1)

t , сут	ϑ , °C	w , %	f_p , °C	f_2 , кВт/(м ² ·ч)	f_3 , мм	f_4 , м/с	y_1 , °C	y_2 , %
1	3,0	82	4,5	0,05	0	2,2	4,0	80
2	3,2	82	4,7	0,07	0	1,4	3,5	81
3	2,9	81	4,9	0,08	0	1,8	2,8	79
4	3,3	81	5,0	0,08	0	2,0	3,0	83
5	4,0	90	5,5	0,1	45	1,0	4,5	88

Оценивание параметров модели показателя всхожести (6) требует особого подхода. Это связано с особенностями технологии возделывания сельскохозяйственных культур и выбором формы самой модели. Так, не смотря на то, что процесс прорастания семян в почве имеет динамический характер, нас интересует только его конечный результат, а именно число всходов на единице площади поля (показатель всхожести), независимо от длительности самого процесса прорастания. В этом случае и рассматривается статическая форма модели, отражающая связь этого показателя от температуры и влажности верхнего слоя почвы. Такой подход

часто применяется в аграрной науке для предсказания различных показателей фенологического развития посевов и конечного урожая от базовых факторов климата и вносимых удобрений. Особенность технологий возделывания сельскохозяйственных культур заключается в том, что решение о сроках сева осуществляется один раз в году и всходы посевов происходят тоже раз в год. Таким образом, для оценивания параметров по полевым данным потребовалось бы 20–25 лет. Поэтому для «сжатия» временного масштаба использовался опыт по определению показателя всхожести в искусственных условиях, когда на отдельных делянках фитотронной установки создавались различные варианты температурно-влажностного режима почвы, чем обеспечивалось достижение разных по величине показателей всхожести. Этим вариантам присваивались номера измеряемых точек и по ним оценивались параметры модели (6). При этом общие для всех делянок внешние климатические возмущения, а именно уровень радиации среды, температура воздуха, осадки и скорость ветра, создавались посредством источников искусственного света (натриевых ламп), кондиционера воздуха и системы орошения. В качестве основной культуры для отработки методики использовались семена яровой пшеницы сорта «эстер».

В табл. 2 приведен фрагмент экспериментальных данных, использованных для оценивания параметров модели (1).

Таблица 2. Фрагмент экспериментальных данных по оцениванию параметров модели (6)

<i>№ измерения</i>	<i>Температура почвы ϑ, °C</i>	<i>Влажность почвы w, %</i>	<i>Показатель всхожести v, %</i>
1	4,5	92	60
2	4,4	94	62
3	6	89	67
4	6,2	85	66
5	7	80	66

Необходимо иметь в виду, что полученные оценки параметров модели всхожести (6), как бы точно ни было выполнено оценивание в искусственных условиях, имеют чисто априорный характер. На точность модели может повлиять изменение качества семян (их внутренняя энергия прорастания), а также физические параметры самой почвы. Поэтому для обеспечения достаточной для принятия решений точности эти оценки требуют уточнения в реальных условиях. Это уточнение может быть реализовано двумя способами. В первом случае можно ежегодно повторять опыт по всхожести семян в тепличных условиях. Во втором — уточнять параметры по реальному показателю полевой всхожести культуры, оцениваемому по данным ДЗЗ. В этом случае учитывается и качество семенного материала, и физические свойства почвы. Но данному подходу свойственен такой недостаток, как невысокая сходимость оценок, в силу того, что за один сезон в идентификационный массив добавляется только одно измерение. Поэтому предпочтительна комбинация этих подходов.

Для лучшего понимания сути методики решения задачи ниже приводится алгоритм ее решения с иллюстрацией промежуточных результатов.

Шаг 0. Предварительно, по данным предыдущих лет или на основании экспериментальных данных, полученных в регулируемых условиях, оцениваются параметры модели показателя всхожести посева (7) культуры, для которой планируется сев. На *рис. 1* приведен график оценивания параметров модели всхожести посева по данным, полученным в регулируемых условиях, чем обусловлена высокая точность моделирования. По оси абсцисс отложены номера вариантов экспериментальных данных (точек измерений).

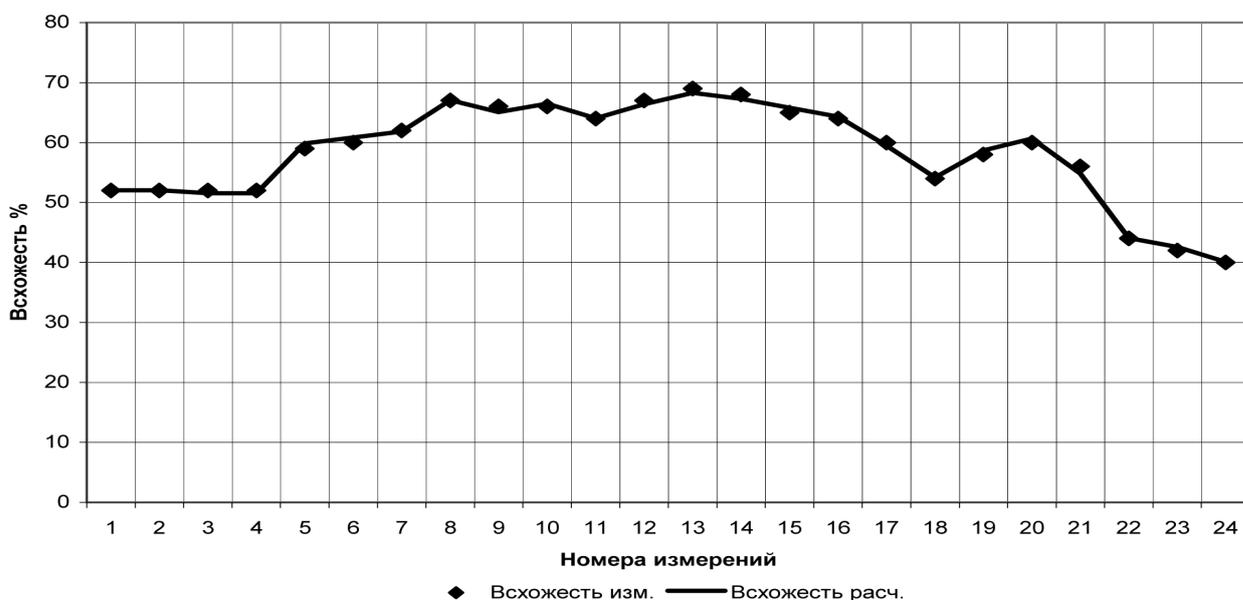


Рис. 1. Процесс идентификации модели всхожести посева (8)

Шаг 1. Ежедневно на 10–12 тестовых площадках рядом с основным полем измеряются температура и влажность поверхностного слоя почвы, значения которых усредняются. Одновременно замеряются метеопараметры: температура приземного слоя воздуха, уровень радиации окружающей среды, интенсивность выпадающих осадков и скорость ветра в приземном слое воздуха. По этим данным уточняются параметры модели (3) выполнением процедуры (6). На *рис. 2* графически представлен процесс оценивания параметров модели (3) по полученным наземным измерениям.

Шаг 2. Одновременно с наземными измерениями температуры и влажности поверхностного слоя почвы получают данные ДЗЗ об оценках этих параметров по площади основного поля, которые усредняются и вводятся вместе с наземными измерениями в алгоритм оптимального оценивания (4). На графиках *рис. 3* представлен процесс построения оптимальных оценок температуры и влажности почвы по спутниковым данным ДЗЗ (MetOp) для опытных полей Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Гатчинский район Ленинградской области), полученных в 2015, 2016 гг. СКО оценивания для этих данных не превышает 5%. Здесь же по этим оценкам построена оценка показателя всхожести.

Шаг 3. По текущим оптимальным оценкам, используемым в качестве начальных условий, с помощью модели (5) осуществляется прогнозирование температуры, влажности и показателя всхожести. На *рис. 4* приведены такие прогнозы, а также прогнозное решение о проведении сева, полученное с упреждением за двое суток. Это позволяет агрономической службе подготовить технику и ресурсы для выполнения этой энергоемкой технологической операции.

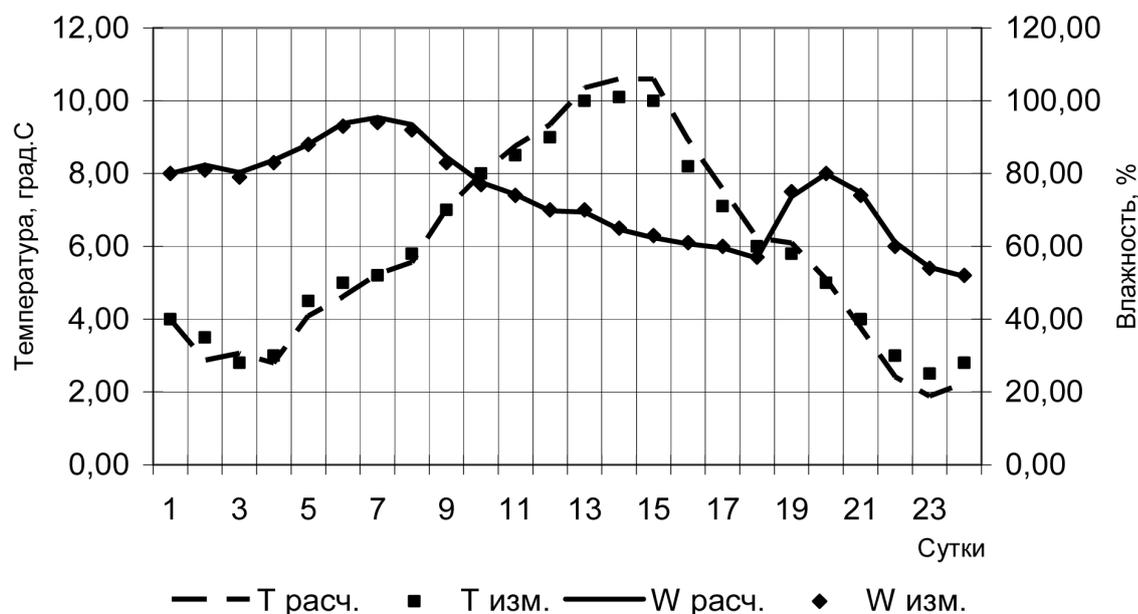


Рис. 2. Процесс идентификации динамической модели (3) по сопоставимым наземным измерениям и данным ДЗЗ

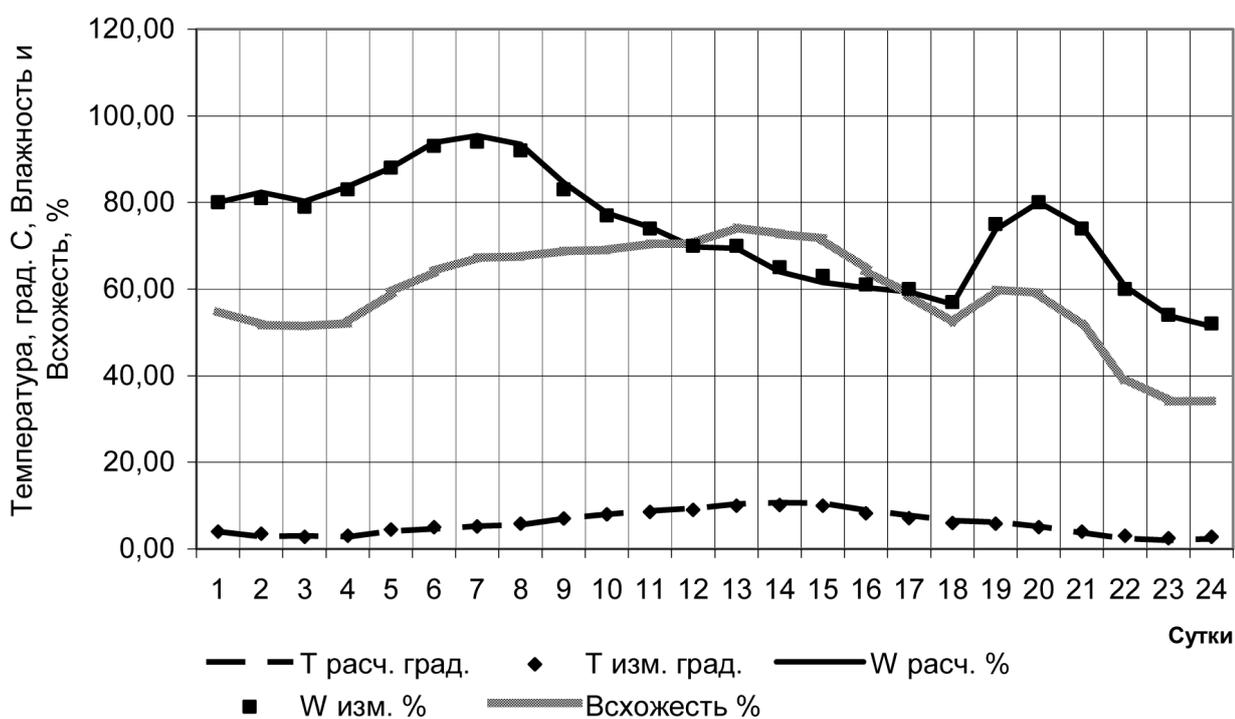


Рис. 3. Процесс построения оценок температуры и влажности почвы по данным ДЗЗ

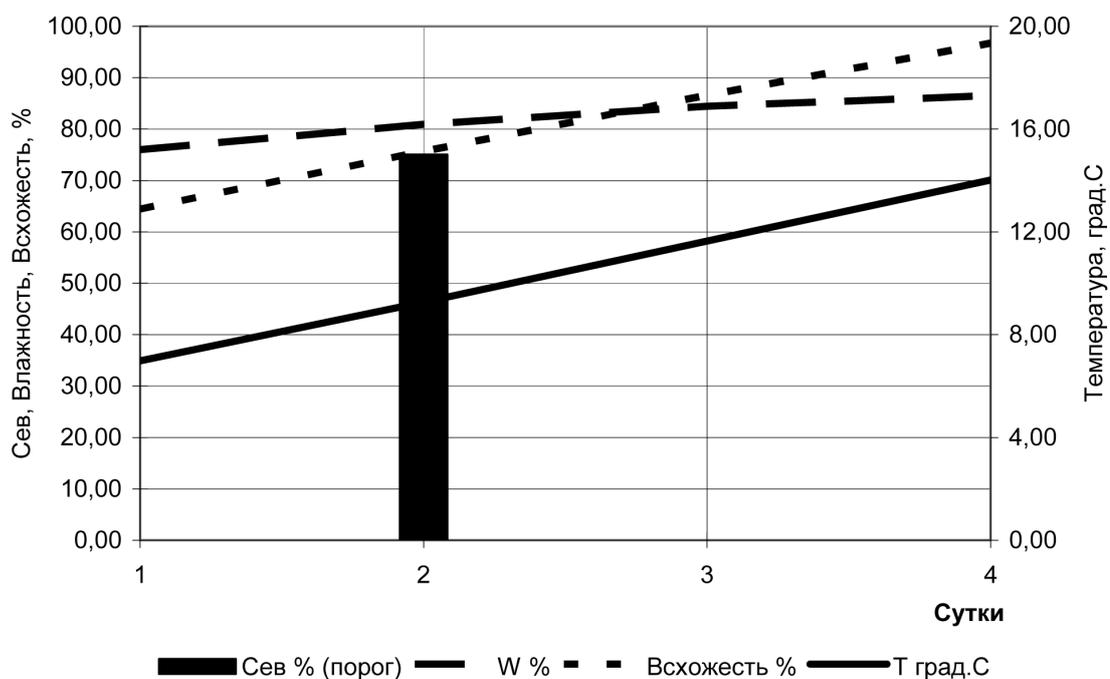


Рис. 4. Процесс прогнозирования и принятия решения о севе

Шаг 4. В момент проведения сева формируют текущие оптимальные оценки температуры и влажности поверхностного слоя почвы, которые фиксируются в базе данных системы. После проведения сева осуществляется мониторинг поверхности поля средствами ДЗЗ до момента наступления всходов, когда оценивается фактический показатель всхожести. Для этого фиксируется число всходов на единице площади поля, которое соотносится с нормой высева семян на единицу площади. Оценка текущего показателя всхожести возможно при пространственном разрешении системы ДЗЗ в 1 м. Поэтому для этой цели целесообразно использовать беспилотные летательные аппараты. Значение текущего показателя всхожести заносится в базу данных системы. По этому показателю и оценкам температуры и влажности поверхностного слоя почвы, зафиксированным в момент сева, уточняют параметры модели показателя всхожести (7).

Выводы

Использование данных дистанционного зондирования Земли в сочетании с наземными измерениями позволяет строить прогнозы температуры и влажности почвы и по ним принимать решение о сроках проведения сева, обеспечивающих требуемую всхожесть посевов сельскохозяйственных культур. Для этого используется динамическая модель температурно-влажностного состояния верхнего слоя почвы, параметры которой оценивают по наземным измерениям. Сочетание этой модели с данными дистанционного зондирования позволяет на основании алгоритмов оптимальной фильтрации получать оценки температуры

и влажности в среднем по площади поля. По полученным оценкам посредством модели всхожести посевов можно формировать текущие и прогнозныe решения о сроках проведения сева сельскохозяйственных культур. При этом для получения прогнозных решений текущие оптимальные оценки температуры и влажности почвы служат начальными условиями для краткосрочных прогнозов температуры и влажности почвы на основе динамической модели температурно-влажностного состояния верхнего слоя почвы.

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-07-00925).

Литература

1. *Быховец С.С., Сороковиков В.А., Мартуганов Р.А., Мамыкин В.Г., Гиличинский Д.А.* История наблюдений за температурой почвы на сети метеорологических станций России // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 1. С. 7–20.
2. *де Гроот М.* Оптимальные статистические решения. М.: Мир, 1974. 492 с.
3. *Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М.* Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 410 с.
4. *Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М.* Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 280 с.
5. *Музылев Е.Л., Успенский А.Б., Волкова Е.В., Старцева З.П.* Использование спутниковой информации при моделировании вертикального тепло- и влагопереноса для речных водосборов // Исследование Земли из космоса. 2005. № 4. С. 35–44.
6. *Михайленко И.М., Полуэтов Р.А., Якушев В.П.* «Агромониторинг»: структура, функции, реализация // Доклады РАСХН. 2004. № 3. С. 66–68.
7. *Михайленко И.М., Курашвили А.Е.* Прогнозирование состояния травостоя в системе управления качеством кормов в молочном животноводстве // Вестник РСХА. 2008. № 2. С. 10–13.
8. *Михайленко И.М.* Основные задачи оценивания состояния посевов и почвенной среды по данным космического зондирования // Экологические системы и приборы. 2011. № 8. С. 17–25.
9. *Соловьев В.И., Успенский С.А., Успенский А.Б.* Эксперименты по дистанционному определению температуры поверхности суши на основе данных с геостационарных метеорологических ИСЗ // Труды «МСАРД-2009». 2009. С. 53.
10. *Соловьев В.И., Успенский С.А.* Мониторинг температуры поверхности суши по данным геостационарных метеорологических спутников нового поколения // Исследование Земли из космоса. 2009. № 3. С. 79–89.
11. *Соловьев В.И., Успенский А.Б., Успенский С.А.* Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 5–17.
12. *Сутовский В.М., Успенский А.Б.* О дистанционном определении температуры подстилающей поверхности с учетом ее нечерноты по данным спутниковых измерений излучения в диапазоне 10,5–12,5 мкм // Тр. ГосНИЦИПР. 1996. Вып. 33. С. 66–78.
13. *Успенский А.Б.* Об оценке температуры поверхности суши по данным спутниковых измерений уходящего ИК излучения в диапазоне 10,5–12,5 мкм // Метеорология и гидрология. 1992. № 10. С. 19–27.
14. *Barton I.J.* Satellite derived SST's: current status // J. Geophysics Researches. 1995. Vol. 5. P. 8777–8790.
15. *Becker F.* The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from satellite // Intern. J. Remote Sensing. 1987. Vol. 8. P. 1509–1522.
16. *Becker F., Li Z.-L.* Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands // Remote Sensing Environmental. 1990. Vol. 32. No. 3. P. 17–33.
17. *Chevallier F., Chedin A., Cheruy N., Mcrette J.J.* TIGR-like atmospheric profile database for accurate radiative flux computation // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2015. Vol. 126. P. 777–785.
18. *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. P. 41–52.
19. *Zlinszky A., Heilmeyer H., Balzter H., Czúcz B., Pfeifer N.* Remote Sensing and GIS for Habitat Quality Monitoring: New Approaches and Future Research // Remote Sensing 2015. No. 7(6). P. 7987–7994.

Management of sowing time according to Earth remote sensing data

I.M. Mikhaylenko, V.N. Timoshin

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

Scientific-based methodical recommendations for the most important decision taken by agronomic services, i.e. decisions, when to start spring sowing, are presented. For this purpose, Earth remote sensing satellite data (NOAA, MetOp and MODIS: satellites EOS-Aqua, Terra) on temperature and humidity of the top soil and ground-based measurements of these parameters at meteorological points are used. The decision is taken on the basis of a criterion, which uses forecasts for seed germination as an indicator. To build up such a forecast, a dynamic model of temperature and humidity of the top soil and a model of germination index are used. High accuracy of temperature and soil moisture estimation and prediction is achieved by using the optimal filtering algorithm, which is realized by combining terrestrial measurements and remote sensing data. Due to this algorithm, the standard error of the estimation of soil temperature and soil humidity is reduced to $\pm 5\%$. Moreover, the optimal estimates of temperature and humidity serve as initial conditions for predicting the criterion of making the decision on sowing time in spring.

Keywords: decision on sowing time, remote sensing data of the Earth, mathematical models, optimal estimations, indicator of crop germination

Accepted: 25.09.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-149-160

References

1. Bykhovets S.S., Sorokovikov V.A., Martuganov P.A., Mamykin V.G., Gilichinskiy D.A., *Istoriya nablyudeniya za temperaturoy pochvy na seti meteorologicheskikh stantsiy Rossii* (The history of observations of soil temperature on the network of meteorological stations in Russia), *Kriosfera Zemli*, 2007, Vol. 11, No. 1, pp. 7–20.
2. de Groot M. *Optimal'nyye statisticheskiye resheniya* (Optimal statistical solutions), Moscow: Mir, 1974, 482 p.
3. Kondrat'yev K.Ya., Timofeyev Yu.M., *Termicheskoye zondirovaniye atmosfery so sputnikov* (Thermal sounding of the atmosphere from satellites), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970, 410 p.
4. Kondrat'yev K.Ya., Timofeyev Yu.M., *Meteorologicheskoye zondirovaniye atmosfery iz kosmosa* (Meteorological sounding of the atmosphere from space), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 280 p.
5. Muzylev E.L., Uspenskiy A.B., Volkova E.V., Startseva Z.P., *Ispol'zovaniye sputnikovoy informatsii pri modelirovaniy vertikal'nogo teplo- i vlagoperenosa dlya rechnykh vodosborov* (The use of satellite information in the modeling of vertical heat and moisture transfer for river watersheds), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2005, No. 4, pp. 35–44.
6. Mikhaylenko I.M., Poluektov R.A., Yakushev V.P., *Agromonitoring: struktura, funktsii, realizatsiya* (Agromonitoring: structure, functions, implementation), *Doklady RASKHN*, 2004, No. 3, pp. 66–68.
7. 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.
8. 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), *Ekologicheskkiye sistemy i pribory*, 2011, No. 8, pp. 17–25.
9. Solov'yev V.I., Uspenskiy S.A., Uspenskiy A.B., *Eksperty po distantsionnomu opredeleniyu temperatury poverkhnosti sushi na osnove dannykh s geostatsionnykh meteorologicheskikh ISZ* (Experiments on remote sensing of land surface temperature on the basis of data from geostationary meteorological satellites), *Trudy MSARD-2009*, 2009, p. 53.
10. Solov'yev V.I., Uspenskiy S.A., *Monitoring temperatury poverkhnosti sushi po dannym geostatsionnykh meteorologicheskikh sputnikov novogo pokoleniya* (Surface temperature monitoring according to the data of geostationary meteorological satellites of the new generation), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 3, pp. 79–89.
11. Solov'yev V.I., Uspenskiy A.B., Uspenskiy S.A., *Opredeleniy temperatury zemnoy poverkhnosti po dannym izmereniy ukhodyashchego teplovogo izlucheniya s geostatsionnykh meteorologicheskikh ISZ* (Determination of the earth's surface temperature from measurements of outgoing heat radiation from geostationary meteorological satellites), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010, No. 3, pp. 5–17.
12. Sutovskiy V.M., Uspenskiy A.B., *O distantsionnom opredelenii temperatury podstilayushchey poverkhnosti s uchetom yeye nechernoty po dannym sputnikovykh izmereniy izlucheniya v diapazone 10.5–12.5 mkm*. (O distantsionnom opredelenii temperatury podstilayushchey poverkhnosti s uchetom yeye nechernoty po dannym sputnikovykh izmereniy izlucheniya v diapazone 10.5–12.5 mkm), *Trudy GosNITSIPR*, 1996, Issue. 33, pp. 66–78.
13. Uspenskiy A.B. *Ob otsenke temperatury poverkhnosti sushi po dannym sputnikovykh izmereniy ukhodyashchego IK izlucheniya v diapazone 10,5–12,5 mkm* (On the assessment of land surface temperature from satellite

- measurements of outgoing IR radiation in the range 10.5-12.5 μm), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1992, No. 10, pp. 19–27.
14. Barton I.J., Satellite derived SST's: current status, *Journal Geophysics Researches*, 1995, Vol. 5, pp. 8777–8790.
 15. Becker F., The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from satellite, *International Journal Remote Sensing*, 1987, Vol. 8, pp. 1509–1522.
 16. Becker F., Li Z.-L., Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands, *Remote Sensing Environmental*, 1990, Vol. 32, No. 3, pp. 17–33.
 17. Chevallier F., Chedin A, Cheruy N., Mockette J.J., TIGR-Iike atmospheric profile database for accurate radiative flux computation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, Vol. 126, pp. 777–785.
 18. Mikhailenko I.M., Assessment of crop and soil state using satellite remote sensing data, *International Journal of Information Technology and Operations Management*, 2013, Vol. 1, No. 5, pp. 41–52.
 19. Zlinszky A., Heilmeier H., Balzter H., Czucz B., Pfeifer N., Remote Sensing and GIS for Habitat Quality Monitoring: New Approaches and Future Research, *Remote Sensing*, 2015, No. 7 (6), pp. 7987–7994.