

СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДЕЛИ ПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

В. В. Терлеев^{1,2}, Р. А. Полуэктов², Б. И. Бакаленко^{2,3}

¹ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251

²ГНУ Агрофизический научно-исследовательский институт Россельхозакадемии
Гражданский проспект, 14, Санкт-Петербург, 195220

³ГНУ ФГБУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург, 199397
E-mail: Vitaly_Terleev@mail.ru

Поступила в редакцию 10 апреля 2012 г., принята к печати 07 июня 2012 г.

Практическое использование модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур наталкивается на значительные трудности, связанные с отсутствием или неполнотой исходной информации. Представленные в статье результаты значительно расширяют область применения модели за счет того, что недостающие данные оцениваются по доступным измеряемым величинам. Авторы данной статьи предлагают именно такие методы, которые позволяют инициализировать модель, что достигается путем преобразования информации, содержащейся в стационарной базе данных, и записью в оперативную базу данных полного набора параметров, необходимых для моделирования. Предложенные методы существенно упрощают предварительную подготовку информации для обеспечения вычислительного процесса с использованием модели.

Ключевые слова: моделирование динамики агроэкосистемы, базы данных, информационное обеспечение.

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальным ядром систем поддержки управленческих решений при реализации технологии точного земледелия является динамическая модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Для применения таких систем обычно требуется значительный объем входных данных как длительного, так и оперативного использования (Якушев и др., 2008а, б). К ним относятся сведения о хозяйстве, культурах севооборота, климате, погоде, поглощающем комплексе и буферных свойствах почвы (Терлеев и др., 2000), а также о почвенно-гидрологических константах, пористости почвы, содержании азота в почве (Полуэктов, Терлеев, 2010) и пр. Многие из перечисленных данных являются условно постоянными и могут корректироваться с периодичностью в несколько лет. Другая же информация характеризует внешние по отношению к объекту моделирования условия, которые изменяются в течение сезона вегетации. И в этот период она должна неоднократно обновляться в режиме «on-line». Например, к такой информации относятся суточные погодные данные, используемые в расчетах

предварительного и уточняющих прогнозов величины урожая при смене фаз фенологического развития сельскохозяйственных растений.

В Агрофизическом институте Россельхозакадемии создан имитационно-программный комплекс AGROTOOL (Полуэктов и др., 2011). Он предназначен для обоснования управленческих решений при возделывании ряда сельскохозяйственных культур по технологии точного земледелия. Степень обоснованности таких решений определяется достоверностью результатов прогнозирования продуктивности агроценозов (Poluektov *et al.*, 2002) с применением динамической модели, интегрированной с комплексом Agrotool. Для его инициализации требуются отмеченные выше многочисленные данные. На практике моделирование динамики агроэкосистемы нередко затруднено проблемой отсутствия или неполноты исходной информации. Целью исследования является разработка методов, позволяющих оценить недостающие данные с использованием доступных измеряемых величин.

МЕТОДЫ

Сложная и разнородная информация требует специальной организации поисков, хранения, преобразования и ввода в динамическую модель агроэкосистемы (Мартин, 1980). Такая организация в настоящее время осуществляется в рамках особой базы данных (БД), сопровождаемой специализированной системой управления (Баденко и др., 2011а, б). Эта база данных разработана в СУБД Access и входит в AGROTOOL в качестве подсистемы. Она имеет иерархическую

реляционную структуру, состоящую из совокупности таблиц типа «сущность – связь». На верхнем уровне иерархии находятся данные о погоде, поступающие с метеорологического поста хозяйства, либо с ближайшей к этому хозяйству метеостанции. Следующий уровень заполняют сведения об опытных или производственных участках (полях). Дальнейшие уровни содержат информацию о схемах полевых опытов и возделываемых культурах. Упрощенная концептуальная схема разработанной БД представлена на рисунке.

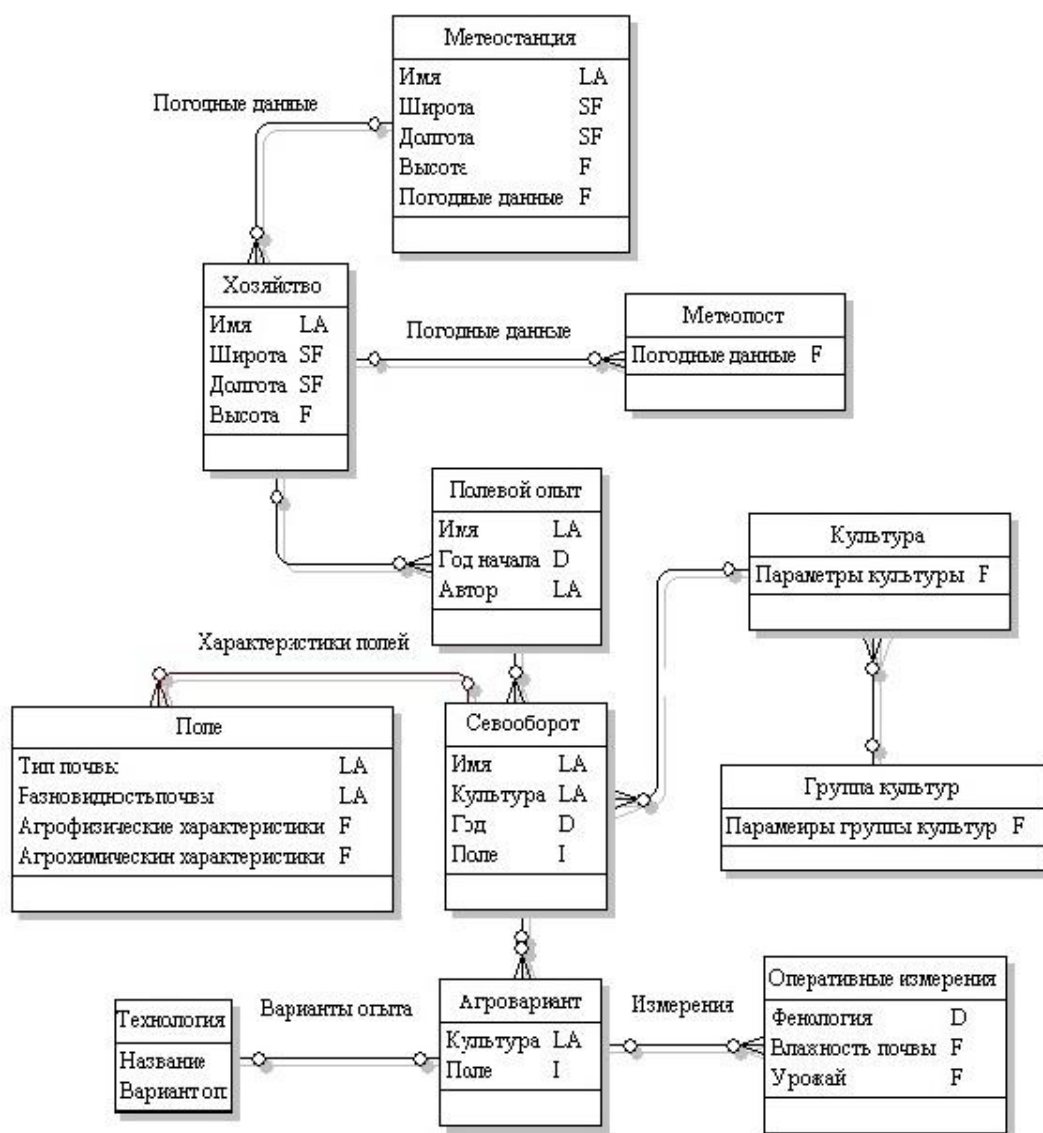


Рис. Упрощенная концептуальная схема AGROTOOL

Содержащаяся в БД информация предназначена для длительного хранения. Она образует стационарную базу данных (СБД). Указанные данные не обеспечивают непосредственной инициализации вычислительного процесса. Для его выполнения пользователем динамической модели должна быть выбрана нужная информация из СБД. При этом в режиме диалога необходимо указать, например: место и время проведения полевого опыта, возделываемую культуру, применяемую агротехнику и т.д. Диалог реализуется управляющей программой - оболочкой модели. Такая программа осуществляет выбор соответствующих данных из СБД, их преобразование (если это необходимо) и запись в оперативную базу данных (ОБД). Именно эта информация и обеспечивает инициализацию процесса счета. Здесь возникает следующая проблема: модель (как жесткая алгоритмическая структура) требует для своего функционирования вполне определенного набора данных, организованных в табличном виде. Именно такая структура и поддерживается ОБД.

Вместе с тем, набор данных, хранящихся в СБД, может не соответствовать подобной организации, либо оказаться неполным. Поэтому на интерфейс между СБД и ОБД (как на часть оболочки системы) накладываются дополнительные функции по преобразованию исходных данных в такую форму, которая воспринимается динамической моделью. Ниже рассмотрены результаты такого преобразования на примере данных о погоде и гидрофизических свойствах почвы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор данных о метеорологической обстановке из СБД, их преобразование и запись в ОБД

В имитационно-программном комплексе AGROTOOL в качестве входных данных динамической модели, характеризующих метеорологическую обстановку, используется следующий набор суточных величин: минимальная температура воздуха, максимальная

температура воздуха, минимальная относительная влажность воздуха, суточная сумма осадков, среднесуточная скорость ветра и коэффициент ослабления солнечной радиации k_{ex} .

Перечисленные метеорологические величины (кроме скорости ветра) измеряются на высоте метеобудки. Измерения скорости ветра производятся на высоте флюгера (7 м). Все величины, за исключением последней, обычно хранящейся непосредственно в СБД, могут быть просто перезаписаны в ОБД. Трудности возникают в отношении коэффициента k_{ex} . Он рассчитывается как отношение потока лучистой энергии Солнца на уровне подстилающей поверхности к потоку солнечной радиации на верхней кромке атмосферы и характеризует режим облачности данного дня. Как установлено предыдущими авторами, значение k_{ex} в средних широтах Северного полушария варьирует в пределах $0.22 \leq k_{ex} \leq 0.76$ (Diepen *et al.*, 1988). При этом верхняя граница соответствует безоблачному дню, а нижняя - дню со сплошной облачностью. Оценка k_{ex} может быть выполнена одним из четырех способов с учетом того, какая именно информация содержится в СБД.

1. В СБД включены значения измеренной суточной коротковолновой радиации Солнца для данного места R_{crop} . В таком случае k_{ex} определяется как

$$k_{ex} = R_{crop} / R_a, \quad (1)$$

а величина R_a , в свою очередь, рассчитывается по соотношению

$$R_a = R_0 \sin h_0, \quad (2)$$

где R_0 - солнечная постоянная, равная $1373 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; h_0 - высота Солнца над горизонтом.

Расчет высоты Солнца производится по формулам:

$$\begin{cases} \sin h_0 = \sin \varphi \cos \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(2\pi(t_h + 12)/24), & (3a) \\ \delta = -0.408 \cos(2\pi(t_d + 10)/365), & (3b) \end{cases}$$

где φ – географическая широта места наблюдения; δ – угол склонения Солнца; t_h – время суток, отсчитываемое от полудня; t_d – номер дня по юлианскому календарю. Соотношения (3а) и (3б) используются следующим образом. Первоначально для текущей даты счета по ним определяется время восхода и захода Солнца, для чего h_0 приравняется к нулю. При этом вычисляется также длительность светового дня N . Значение высоты Солнца h_0 в пределах одних суток может рассчитываться после этого по формуле (3а) с любым шагом по времени.

2. В СБД хранится измеренная сумма часов солнечного сияния n (это наиболее распространенный случай). В таком случае для солнечной радиации, приходящей на горизонтальную площадку у поверхности почвы, справедлива формула Ангстрема (Dierpen *et al.*, 1988):

$$R_c = (a_{sn} + b_{sn} n/N)R_a = k_{ex} R_a, \quad (4)$$

где N – длительность светового дня; n – сумма часов солнечного сияния; a_{sn} , b_{sn} – эмпирические параметры.

3. Показателем, который характеризует режим облачности, является общая облачность в баллах, варьирующая в диапазоне от нуля до десяти. При этом для оценки k_{ex} используется соотношение:

$$k_{ex} = k_0 + k_1 Cl + k_2 Cl^2, \quad (5)$$

где Cl – общая облачность в баллах, k_j – эмпирические коэффициенты ($j=0,1,2$).

4. В практике агрометеорологических расчетов встречается ситуация, когда длительность солнечного сияния или облачность на метеостанции вообще не определяются, хотя остальные данные фиксируются в полном объеме; кроме того, не проводятся измерения и приходящей к посеву солнечной радиации. Например, подобная ситуация характерна для метеорологического поста, который расположен непосредственно в хозяйстве. В таком исключительном случае используется регрессионная зависимость

$$k_{ex} = c_1 + c_2 T_{\max} + c_3 T_{\min}, \quad (6)$$

где T_{\max} и T_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения температуры воздуха, а c_1 , c_2 , c_3 – суть эмпирические константы.

Разумеется, наиболее точные оценки k_{ex} достигаются в первом и во втором вариантах исходных данных. Четвертый вариант приводит к максимальным погрешностям. Тем не менее, как показал многолетний опыт авторов по моделированию продукционного процесса сельскохозяйственных культур, неточность, возникающая в аналогичном случае, не оказывает существенного влияния на конечный результат расчета – прогноз величины урожая (Полужтков и др., 2006).

Выбор данных о гидрофизических характеристиках почвы из СБД, их преобразование и запись в ОБД

Использование имитационно-программного комплекса AGROTOOL, описывающего, в частности, динамику почвенной влаги и перенос растворенных веществ по профилю почвы, сопряжено со значительными трудностями, которые связаны с отсутствием или неполнотой исходных данных о гидрофизических свойствах почвы. Например, такая проблема возникает при попытке применить AGROTOOL для предсказания дат смены фаз фенологического развития растений, а также для прогнозирования величины будущего урожая. Часто в подобных случаях известны только тип почвы, разновидность по гранулометрическому составу и плотность сложения почвы, а также (как исключение) некоторые почвенно-гидрологические константы и коэффициент фильтрации влаги в почве (Арефьев и др., 2011а, б).

Представленные в работе результаты позволяют значительно расширить область применения динамической модели агроэкосистемы за счет того, что недостающие для ее инициализации данные оцениваются с использованием более доступной информации. Для вычисления динамики почвенной влаги, осуществляемого в модели, необходимы почвенно-гидрофизические показатели, важнейшими из которых являются водоудерживающая способность (основная гидрофизическая характеристика – ОГХ) и влагопроводность (гидравлическая проводимость) почвы.

Водоудерживающая способность почвы

Эффективность моделирования зависимости между влажностью почвы и капиллярно-сорбционным потенциалом почвенной влаги во многом определяется доступностью исходных данных и их информативностью. Данные прямых измерений ОГХ наиболее информативны, но обычно оказываются малодоступными из-за необходимости выполнения весьма трудоемких лабораторных исследований. Кроме того, результаты таких исследований не всегда достаточно надежны, поскольку для проведения измерений в разных диапазонах значений капиллярно-сорбционного потенциала почвенной влаги могут использоваться методы, существенно отличающиеся по точности (Полуэктов и др., 2003).

Один из возможных альтернативных путей определения водоудерживающей способности почвы (параметров ОГХ) основан на использовании набора стандартизованных агрофизических показателей. Такой набор содержит: 1) разновидность почвы по гранулометрическому составу; 2) плотность твердой фазы почвы $\rho_{тф}$ и 3) плотность сложения почвы ρ , а также 4) почвенно-гидрологические константы (полная влагоемкость - ПВ, максимальная капиллярно-сорбционная влагоемкость - МКСВ, наименьшая влагоемкость - НВ, влажность разрыва капилляров - ВРК, максимальная гигроскопичность - МГ и влажность завядания - ВЗ (Терлеев, 1989).

С внедрением имитационно-программного комплекса AGROTOOL в практику прогнозирования величины урожая сельскохозяйственных культур неизбежно возникает проблема получения надежных приближенных оценок параметров ОГХ при отсутствии полного набора необходимых стандартизованных агрофизических показате-

телей. Например, в архивных данных Гидрометеослужбы нередко отсутствуют сведения об НВ. Наиболее типичной является ситуация, когда в распоряжении пользователя AGROTOOL имеется неполный набор данных, который содержит только ρ , МГ и/или ВЗ, ПВ, а также разновидность почвы по гранулометрическому составу. В данной работе описывается метод оценивания ВРК, МКСВ, НВ и ПВ, а также вычисления параметров почвенно-гидрофизических моделей при отсутствии части информации в исходном наборе данных (Полуэктов, Терлеев, 2002, 2005).

Для расчета динамики почвенной влаги в AGROTOOL используется функция, достаточно точно аппроксимирующая зависимость между объемной влажностью почвы θ и капиллярно-сорбционным потенциалом почвенной влаги ψ . Эта функция предложена Хаверкампом с соавторами (Haverkamp *et al.*, 1977). Она имеет вид:

$$\theta = \theta_{\min} + \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{1 + b(-\psi)^a}, \quad (7)$$

где θ_{\max} , θ_{\min} , a и b - эмпирические коэффициенты (параметры ОГХ).

Для вычисления указанных коэффициентов необходимы четыре почвенно-гидрологические константы МГ, ВЗ, МКСВ и ПВ, а также соответствующие значения капиллярно-сорбционного потенциала почвенной влаги $\psi_{ВЗ}$ и $\psi_{МКСВ}$. Для оценивания θ_{\min} и θ_{\max} используются МГ и ПВ. Предполагаются справедливыми равенства: $\theta_{\min} = МГ$ и $\theta_{\max} = ПВ = 1 - \rho/\rho_{тф}$ (Воронин, 1986). Здесь $\rho_{тф}$ - величина плотности твердой фазы почвы (значение этой величины принимается равным $2.65 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$).

Расчет двух остальных параметров функции (7) осуществляется по формулам:

$$\left\{ \begin{aligned} a &= \ln \left(\frac{(ПВ - МКСВ)(ВЗ - МГ)}{(МКСВ - МГ)(ПВ - ВЗ)} \right) \ln^{-1} \left(\frac{-\psi_{МКСВ}}{-\psi_{ВЗ}} \right); & (8a) \\ b &= (-\psi_{МКСВ})^{-a} (ПВ - МКСВ) / (МКСВ - МГ). & (8b) \end{aligned} \right.$$

Из литературных источников известно, что $\Psi_{ВЗ}$ достигает значения -15000 см вод. ст. Капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги $\Psi_{МКСВ}$ связан с МКСВ эмпирической зависимостью (Воронин, 1986):

$$-\Psi_{МКСВ} = 10^{2.17+МКСВ/\rho}. \quad (9)$$

Для определения искомым значений МКСВ и $\Psi_{МКСВ}$ применяется оригинальный прием, который разработан в результате обобщения репрезентативной выборки экспериментальных данных и теоретических построений (Terleev *et al.*, 2010) и опирается на нижеизложенное предположение. Оно предположение состоит в том, что графики зависимостей (7) и (9) пересекаются при потенциале почвенной влаги, которому соответствует максимум функции дифференциальной влагоемкости почвы. Данная функция рассчитывается с использованием коэффициентов a и b , вычисляемым по формулам (8a, 8b) путем перебора возможных значений МКСВ в диапазоне от ВЗ до ПВ с соответствующим пересчетом $\Psi_{МКСВ}$ по формуле (9). Искомым параметрам функции (7) присваиваются значения коэффициентов a и b , с использованием которых отыскиваются МКСВ и $\Psi_{МКСВ}$. Расчет наименьшей влагоемкости осуществляется по формуле:

$$НВ = \theta_{\min} + \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{1 + b(-\Psi_{НВ})^a}.$$

Вслед за предшественниками значение $\Psi_{НВ}$ принимается равным -330 см вод. ст. Почвенно-гидрологическая константа ВРК и соответствующий ей капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги $\Psi_{ВРК}$ оцениваются по координатам точки пересечения кривой ОГХ (7) и графика эмпирической зависимости (Воронин, 1986):

$$-\Psi_{ВРК} = 10^{2.17+3\cdot ВРК/\rho}.$$

Предложенный метод позволяет получить оценки почвенно-гидрологических кон-

стант и параметров ОГХ (7), необходимых для инициализации AGROTOOL.

Влагопроводность почвы

Для количественного описания движения воды и растворенных веществ в почве наряду с ОГХ используется (как уже отмечалось) еще один почвенно-гидрофизический показатель – влагопроводность (гидравлическая проводимость) почвы. Он является функцией капиллярно-сорбционного потенциала почвенной влаги $k^w(\Psi)$ и характеризует скорость влагопереноса в почве при инфильтрации, перераспределении и эвапотранспирации.

Экспериментальные данные о гидравлической проводимости почвы (как и об ОГХ) малодоступны по причине высокой трудоемкости их получения. Кроме того, они могут иметь значительные погрешности. Однако даже прецизионное определение влагопроводности почвы не является достаточным условием достижения требуемой точности в описании переноса влаги и растворенного вещества по почвенному профилю из-за особенностей метода решения соответствующего дифференциального уравнения (Терлеев, 2001).

В этой связи, к числу важнейших задач почвенной гидрофизики относится определение влагопроводности почвы и идентификация моделей $k^w(\Psi)$ на основе доступных косвенных данных (Банкин и др., 1988). Одним из наиболее известных и широко используемых методов определения влагопроводности почвы по данным об ОГХ и коэффициенте фильтрации почвенной влаги k_s^w является метод Муалема (Mualem, 1976). В соответствии с указанным методом расчет гидравлической проводимости почвы для заданных значений Ψ (или θ) осуществляется по формуле:

$$\begin{cases} k^w = k_s^w \sqrt{\hat{\delta}} \left(f_m(\hat{\delta}) / f_m(1) \right)^2, \\ \hat{\delta} = \hat{\delta}(\Psi) = (\theta(\Psi) - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min}), f_m(\hat{\delta}) = \int_0^{\hat{\delta}} d\hat{\delta} / \Psi(\hat{\delta}). \end{cases}$$

Полученную зависимость $k^w = k^w(\psi)$ обычно аппроксимируют с помощью функции, вид которой определяется решаемой задачей. Интерфейс между СБД и ОБД в имитационно-программном комплексе AGROTOOL использует для этого степенную функцию $k^w = k_s^w(-\psi)^c$; здесь c – эмпирический параметр.

Проведенные вычислительные эксперименты показали приемлемую для практических целей точность оценивания параметров AGROTOOL, отсутствовавших в исходном наборе данных (Poluektov, Terleev, 2007).

ВЫВОДЫ

1. Разработанные методы расчета позволяют осуществить процедуру инициализации динамической модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур, т.е. преобразовать содержащуюся в СБД информацию и записать в ОБД полный набор данных.

2. Данные, недостающие для «запуска на счет» имитационно-программного комплекса AGROTOOL, оценены по доступным измеряемым величинам.

3. Оценки почвенно-гидрологических констант и параметров почвенно-гидрофизических моделей имеют приемлемую для практических целей точность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке DAAD, DFG и РФФИ № 09-05-00415-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арефьев Н. В., Полуэктов Р. А., Mirschel W., Баденко В. Л., Терлеев В. В. 2011а. Гидрофизические исследования в почвенно-мелиоративных изысканиях. Тезисы Международ. научно-практич. конф. Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения. Часть I. Комплексное обустройство ландшафтов, ФГБОУ ВПО МГУП, Москва, 11-12 апреля 2011, с. 16–21.
- Арефьев Н. В., Баденко В. Л., Терлеев В. В., Латышев Н. К., Крылова И. Ю., Глядченкова Н. А. 2011б. Определение водно-физических свойств почв при мелиоративных изысканиях. Мелиорация и водное хозяйство. 2:18-21.
- Баденко В. Л., Баденко Г. В., Терлеев В. В., Латышев Н. К. 2011а. ГИС-технологии в информационном обеспечении системы имитационного моделирования AGROTOOL. Агрофизика. 3:1-5.
- Баденко В. Л., Терлеев В. В., Латышев Н. К., Крылова И. Ю., Муравьева Л. С. 2011б. Агрофизические исследования почвы для технологий точного земледелия: постановка задачи и метод. Плодородие. 1:29-31.
- Банкин М. П., Заславский Б. Г., Терлеев В. В. 1988. Автоматизированная система определения влагопроводности почв. Науч.-техн. бюлл. по агр. физике. АФИ. Ленинград. 72:33-36.
- Воронин А. Д. 1986. Основы физики почв. Изд-во МГУ. Москва. 244 с.
- Мартин Дж. 1980. Организация баз данных в вычислительных системах: Пер. с англ. / Под ред. А. А. Стогния и А. Л. Щерса. – М.: Мир. 664 с.
- Полуэктов Р. А., Терлеев В. В. 2002. Моделирование водоудерживающей способности и дифференциальной влагоемкости почвы. Метеорология и гидрология. 11:93-100.
- Полуэктов Р. А., Опарина И. В., Терлеев В. В. 2003. Три способа расчета динамики почвенной влаги. Метеорология и гидрология. 11:90-98.
- Полуэктов Р. А., Терлеев В. В. 2005. Моделирование водоудерживающей способности почвы с использованием агрогидрологических характеристик. Метеорология и гидрология. 12:98-103.
- Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В. В., Топаж А. Г. 2006. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений. Изд-во СПбГУ. Санкт-Петербург. 392 с.

- Полуэктов Р. А., Терлеев В. В. 2010. Компьютерная модель динамики содержания азота в корнеобитаемом слое почвы. *Агрохимия*. 10:68-74.
- Полуэктов Р.А., Топаж А. Г., Терлеев В. В., Бакаленко Б. И., Полуэктов М. А., Кобылянский С.Г. 2011. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011611819 AGROTOOL, v. 4 - программа для поливариантного расчета динамики продукционного процесса сельскохозяйственных растений. Реестр программ для ЭВМ. 28.02.2011.
- Терлеев В. В. 1989. Моделирование водно-солевого переноса в почве в рамках комплексной модели продукционного процесса. Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. АФИ. Ленинград. 19 с.
- Терлеев В. В., Кокотов Ю. А., Крейер К. Г., Федотов М. В. 2000. Исследование обменного калия в дерново-подзолистой супесчаной почве методом Бекетта. *Агрохимия*. 9:29-35.
- Терлеев В. В. 2001. Моделирование обмена, переноса и поглощения фосфора и калия в корнеобитаемом слое почвы. Автореферат диссертации на соискание степени доктора сельскохозяйственных наук. ГНУ АФИ. Санкт-Петербург. 40 с.
- Якушев В. П., Полуэктов Р. А., Петрова М. В., Терлеев В. В., Петрушин А. Ф., Бакаленко Б. И. 2008а. Имитационно-экспертная система поддержки агротехнологических решений (концепция). *Вестник РАСХН*. 5:7-9.
- Якушев В. П., Полуэктов Р. А., Петрова М. В., Терлеев В. В., Петрушин А. Ф., Бакаленко Б. И. 2008б. Имитационно-экспертная система поддержки агротехнологических решений (реализация). *Вестник РАСХН*. 6:6-9.
- Diepen, van C.A., Rappold C., Wolf J., Keulen, van H. 1988. Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 4.1. Wageningen, The Netherlands: Centre for World Food Studies. 299 p.
- Haverkamp R., Vauclin M., Touma J., Wierenga P.J., Vachaud G. 1977. A comparison of numerical simulation model for one-dimensional infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:285-294.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12:513-522.
- Poluektov R. A., Fintushal S. M., Oparina I. V., Shatskikh D. V., Terleev V.V., Zakharova E. T. 2002. Agrotool - a system for crop simulation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1476-3567. 48(6):609-635.
- Poluektov R. A., Terleev V. V. 2007. Crop simulation model of the second and the third productivity levels. In Kersebaum K. Ch., Hecker J.-M., Mirschel W. (eds.) *Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop system*. Springer. P. 75-89.
- Terleev V. V., Mirschel W., Schindler U., Wenkel K.-O. 2010. Estimation of soil water retention curve using some agrophysical characteristics and Voronin's empirical dependence. *Journal International Agrophysics*. 24(4):381-387.

