



CACILM



RESEARCH  
PROGRAM ON  
Dryland Systems

CENTRAL ASIAN COUNTRIES INITIATIVE ON LAND MANAGEMENT – KNOWLEDGE SHARING PLATFORM



## *FAO AquaCrop Model 4.0:*

эффективное водопользование и  
прогнозирование урожайности  
сельскохозяйственных культур

Ташкент - 2016

Доктор с.-х. наук, проф. Ибрагимов Назирбай Мадримович,  
Научно-исследовательский институт селекции, семеноводства и агротехнологии возделывания  
хлопка (Ташкент, Узбекистан)

*FAO AquaCrop Model 4.0: эффективное водопользование и прогнозирование  
урожайности сельскохозяйственных культур*

Данная брошюра была опубликована с помощью проекта «Управление Знаниями» в рамках второй фазы Инициативы Стран Центральной Азии по Управлению земельными ресурсами (ИСЦАУЗР), Научно-исследовательской Программой КГМСХИ в засушливых системах во главе с Международным центром сельскохозяйственных исследований в засушливых зонах (ИКАРДА).

Мнения выраженные в данной брошюре, принадлежит автору и не обязательно отражают точку зрения засушливых систем, ИКАРДА, или КГМСХИ.

В брошюре приведена краткая характеристика, составные части и возможности, этапы симуляции (прогноза) модели FAO AquaCrop 4.0. В ней подробно описан набор необходимых данных для введения в модель, результаты симуляций, сравнение и статистическая оценка фактических и прогнозных параметров почвы, воды и растений.

Брошюра подготовлена на основе руководства по использованию модели AquaCrop ([www.fao.org/nr/water/aquacrop.html](http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html)). Данные по хлопчатнику, в качестве примера для введения в модель и симуляции, представлены д-ром Стив Эветт (Dr. Steve Evett, USDA-ARS-CPRL), ведущим научным сотрудником Опытной станции по консервации и производству Службы сельскохозяйственных исследований Департамента сельского хозяйства США. Автор брошюры выражает свою благодарность д-ру Стиву Эветт.

Данная брошюра не прошла стандартной процедуры рецензирования ИКАРДА.

Данная брошюра предназначена для аспирантов, докторантов, соискателей, научных сотрудников НИИ, преподавателей ВУЗов и специалистов сельского хозяйства.

Ответственный редактор: Д.с.-х. н, академик Мирзажанов К.М.

Рецензенты: К.с.-х.н., доцент Норкулов У.

К.с.-х.н., старший научный сотрудник Хасанов М.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУПЛЕНИЕ .....	4
1. Краткая характеристика модели AquaCrop.....	6
2. Составные части и возможности модели .....	8
3. Этапы симуляции.....	11
4. Набор данных для введения в модель .....	19
4.1 Климатические данные.....	21
4.2 Данные по сельскохозяйственной культуре.....	23
4.3 Данные по орошению .....	34
4.4 Полевые данные .....	34
4.5 Характеристика почвы .....	35
4.6 Уровень грунтовых вод .....	35
5. Симуляция .....	36
6. Результаты симуляции .....	39
Использованная литература.....	44
<i>Приложения</i> .....	45

## ВСТУПЛЕНИЕ

Сельское хозяйство, среди секторов народного хозяйства, считается самым крупным потребителем воды. При существующей ограниченности водных ресурсов и неуклонном росте численности населения земного шара, производство продуктов питания и волокна в достаточных количествах является важной задачей, стоящей перед работниками сельского хозяйства. В этой связи, для разумного использования имеющихся водных ресурсов в поливном земледелии, считается целенаправленным широкое использование высокоэффективных способов и техники полива, а также современных методов моделирования с целью получения высоких и качественных урожаев сельскохозяйственных культур. Одним из них является модель AquaCrop, разработанная ФАО<sup>1</sup> в упрощенном виде для специалистов сельского хозяйства.

В научной литературе модель сельскохозяйственной культуры характеризуется по-разному. По Loomis и другим (1979) модель с/х культуры – это упрощенная реальная система. Monteith (1996) характеризует модель с/х культуры как цифровую систему, в которой принимаются во внимание важные генетические и почвенно-экологические факторы, а также есть возможность прогнозирования роста, развития и урожайности культур.

Как правило, модель сельскохозяйственной культуры используется в следующих целях (Whisler et al. 1986; Boote et al. 1996):

- при синтезе знаний в результате анализа результатов научных исследований и агрономическом подходе; это, в свою очередь, сокращает количество опытов и расходы на проведение научных исследований;
- разработанные сценарии оказывают тесную помощь специалистам сельского хозяйства для своевременного проведения агротехнологических мероприятий (посев, поливы, внесение удобрений и другие) по возделыванию различных культур;
- при анализе планирования и управления.

В зависимости от целей и задач, моделирование можно разделить на два вида (Steduto et al. 2009): (i) научную и (ii) агрономическую. Научное моделирование – механистическое, о деятельности системы, основано на научной теории и законах. Оно используется для глубокого понимания физиологии растений и отношения культуры к определенным почвенно-климатическим условиям. Агрономическая модель считается функциональной, основана на теории и точной

---

<sup>1</sup> Продовольственная и сельскохозяйственная организации ООН

эмпирической взаимосвязи. Поэтому, цель агрономического моделирования – разработка рекомендаций фермерам и специалистам по агротехнологии выращивания сельскохозяйственных культур.

Первые исследования по моделированию роста, развития и урожайности культур, а также других почвенных и растительных параметров были начаты в 60-х годах прошлого столетия в США. В дальнейшем, подобные изыскания были развиты в других странах мира, в результате которых были созданы такие модели с/х культур как CERES (Jones and Kiniry, 1986), EPIC (Williams et al., 1989), ALMANAC (Kiniry et al., 1992), CropSyst (Stockle et al., 2003), DSSAT (Jones et al., 2003), Wageningen models (van Ittersum et al., 2003), APSIM (Keating et al., 2003) и другие.

С помощью модели AquaCrop, разработанной ФАО, в зависимости от потребностей растений в воде, можно создавать различные сценарии, то есть можно прогнозировать рост, развитие и урожайность разных культур в определенных почвенно-экологических условиях. Данная модель создана взамен метода ФАО (Doorenbos and Kassam, 1979), которая используется для расчёта продуктивности воды в зависимости от агротехнологии возделывания и водообеспеченности культуры.

С помощью модели AquaCrop можно выполнить следующее:

- прогнозировать урожайность культур при условии ограниченности водных ресурсов;
- провести сопоставительный анализ планового и фактического урожая, выяснить причины его снижения в масштабе поля, фермерского хозяйства и региона в целом;
- для разных условий климата разработать оптимальный режим орошения для достижения высоких урожаев культур;
- разработать режим орошения культуры при дефиците воды для поливов;
- оценить влияние орошения на планируемый урожай при лимитном водораспределении;
- разработать сценарии урожайности культур в севооборотах и изменении климата;
- разработать рациональное водопользование при ограниченных водных ресурсах;
- оценить фактическую (биологическую/экономическую) продуктивность воды в масштабе поля, фермерского хозяйства или целого региона;
- оказать непосредственную помощь руководителям и специалистам в водораспределении.

# 1. Краткая характеристика модели AquaCrop

Модель AquaCrop направлена на фундаментальную зависимость (Рис. 1) между биомассой растения (B) и транспирацией (Tr), где продуктивность воды (WP) считается консервативным параметром (Steduto et al. 2009).

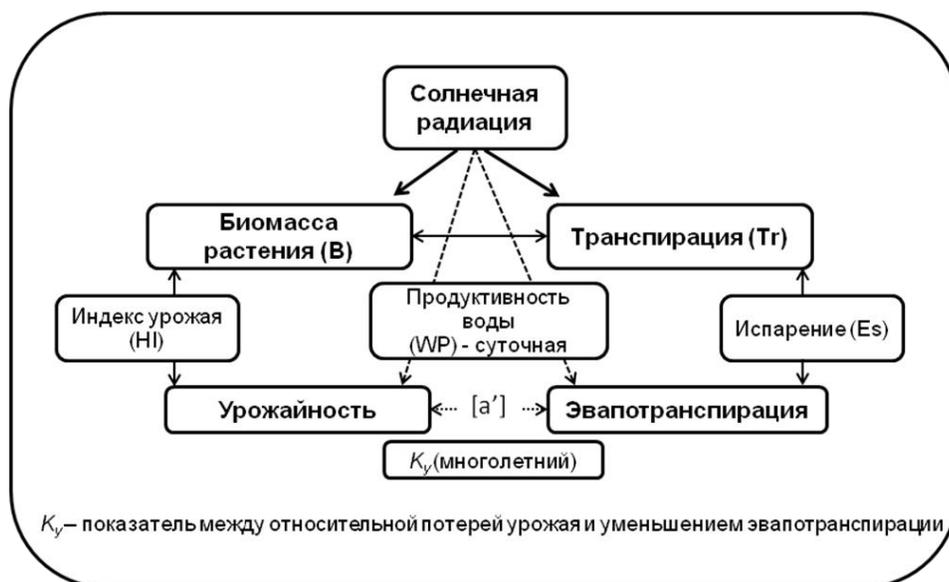


Рис. 1. Фундаментальная зависимость между биомассой растения и транспирацией в модели AquaCrop

Модель AquaCrop создана на основе подхода, изложенного в работе “FAO Irrigation & Drainage Paper n. 33” (Doorenbos and Kassam, 1979):

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad [1]$$

Где,

$Y_x$  и  $Y_a$  – максимальный и фактический урожай;

$ET_x$  и  $ET_a$  – максимальная и фактическая эвапотранспирация;

$K_y$  – показатель между потерей урожая и снижением эвапотранспирации (Рис. 2).

Кроме того, в модели AquaCrop получили дальнейшее развитие (Raes et al. 2010, 2011, 2012):

- 1) эвапотранспирация (ET) – транспирация растениями (Tr) и испарение из почвы (E) разделены для расчленения непроизводительного использования воды растениями;
- 2) модель накопления растениями надземной биомассы;
- 3) финальный урожай принят как функция биомассы и индекса урожая;

4) влияние водного стресса на растения разделено на четыре компонента: развитие надземной биомассы, торможение накопления биомассы, транспирация (Tr) и индекс урожая (HI – соотношение общей надземной сухой массы растения к массе урожая).

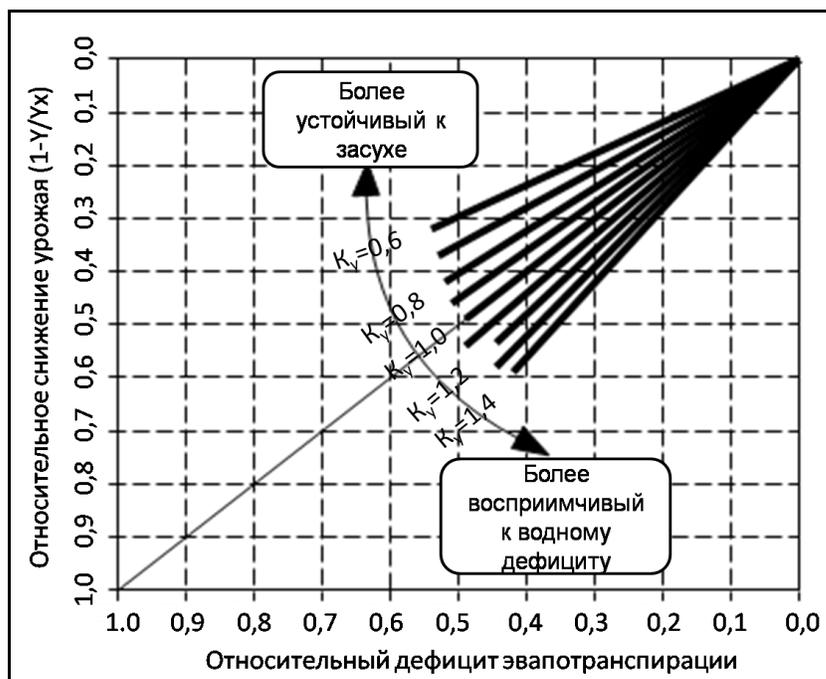


Рис. 2. Зависимость между относительным снижением урожайности в период вегетации растений и относительным стрессом эвапотранспирации

В модели AquaCrop следующее уравнение считается основным:

$$B = WP \times \Sigma Tr \quad [2]$$

Где,

$B$  – надземная биомасса растений;

$WP$  – продуктивность воды (кг/м<sup>2</sup> или биомасса относительно кумулятивной транспирации);

$\Sigma Tr$  – кумулятивная транспирация (мм).

В этом уравнении (Eq [2]) суточные данные взаимосвязаны, в связи с чем, отношение растений к водному стрессу учитывается точнее. А в уравнении Eq [1], указанная выше зависимость касается всего вегетационного периода или определённой фазы развития растений.

Как и в других моделях, система “почва-растение-атмосфера” AquaCrop включает следующее: (i) почва и баланс воды в ней; (ii) рост, развитие растений и процессы накопления

урожая; (iii) атмосфера и её термальный режим, осадки, испарение с поверхности почвы и концентрация CO<sub>2</sub> в воздухе.

Отличительные стороны AquaCrop от других моделей:

- посвящена в основном вопросам воды и орошения;
- используется показатель покрытия поверхности почвы растительной биомассой вместо индекса листовой поверхности;
- используется показатель модифицированной продуктивности воды;
- требуется минимальный набор данных для введения в модель;
- удобен для пользователей;
- прост, работает правильно и точно;
- можно использовать в разных сельскохозяйственных системах.

Модель AquaCrop можно бесплатно скачать с сайта ФАО в интернете (<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>). В этом сайте ФАО также имеется руководство по применению модели AquaCrop и примеры, в каком формате следует подготовить данные для введения в модель.

## **2. Составные части и возможности модели**

Функциональная зависимость составных частей и система расчётов модели AquaCrop приведены на рис. 3 и 4. При симуляции (прогнозировании) различных показателей и процессов расчёты в модели осуществляются следующим образом:

- *Баланс воды в почве.* Запасы воды в корнеобитаемом слое почвы определяются путем учётов приходных и расходных его количеств. Снижение влажности почвы в корнеобитаемом слое определяет коэффициент дефицита воды, что свою очередь влияет на следующие параметры: (1) накопление зелёной биомассы (CC), (2) деятельность устьиц листа и транспирацию (Tr) относительно биомассы, старение биомассы (c) и снижение её количества, (3) индекс урожая и (4) скорость углубления корневой системы.

- *Развитие растений* симулируется, где надземная биомасса растений рассчитывается путем её отделения от развития корневой системы. При расчётах роста и развития растений в условиях водного дефицита, взаимосвязь развития надземной биомассы и корневой системы в модели не

находится в прямой пропорциональности. В модели характеристика роста растений основана на накоплении биомассы.

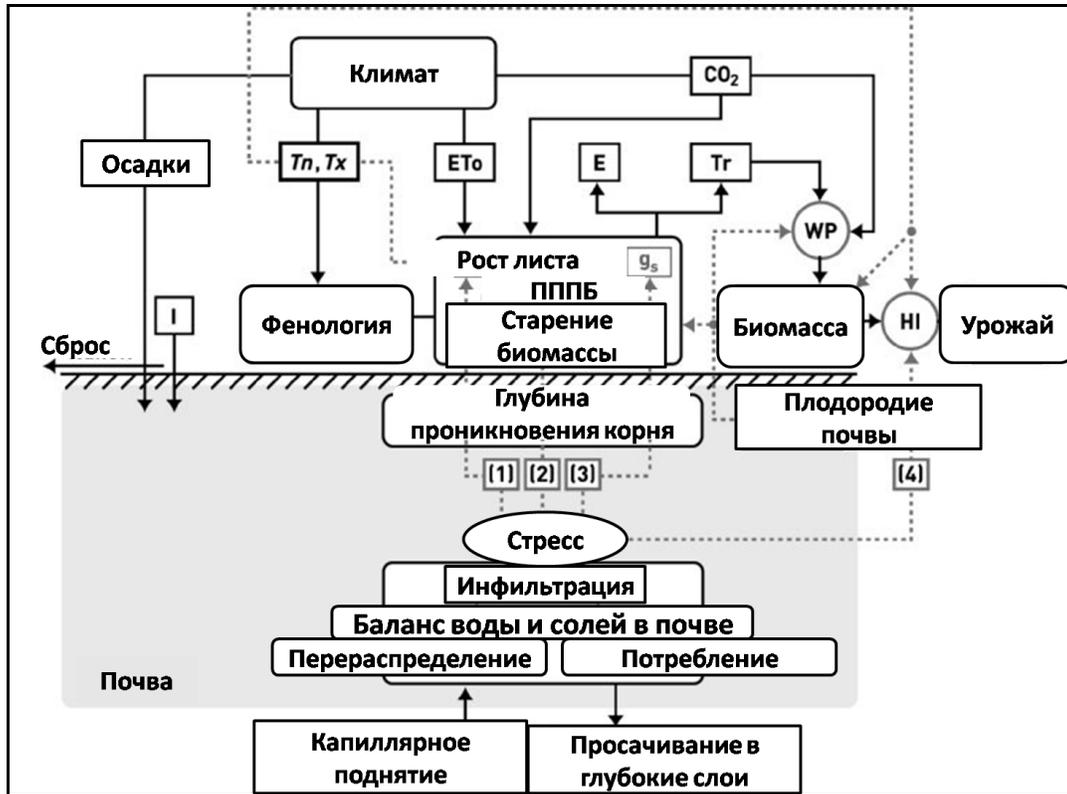


Рис. 3. Функциональная зависимость составных частей модели AquaCrop в системе «Почва-растение-атмосфера» (I – полив, Tn – min температура воздуха, Tx – max, ETo – относительная эвапотранспирация, E – испарение из почвы, Tr – транспирация растениями; gs – деятельность устьев листа; WP – продуктивность воды; НИ – индекс урожая, CO<sub>2</sub> – содержание углекислого газа в воздухе; ПППБ – покрытие поверхности почвы биомассой; (1), (2), (3), (4) – функции водного стресса показателей: соответственно рост листа, старение биомассы, открытие/закрытие устьиц листа и индекс урожая. Сплошные линии показывают зависимость между изменяющимися показателями и процессами.

В этой связи, развитие надземной зелёной биомассы и процесс её старения определяет интенсивность транспирации. Это, в свою очередь, определяет количество накопившейся биомассы и урожая. В случае дефицита воды, прогнозная биомасса (CC) снижается, по сравнению с потенциальной биомассой растений (CCpot). Также, при этом ограничивается развитие корней растений.

- *Транспирация растениями (Tr)* в модели рассчитывается путем умножения двух показателей: потенциала испарения воды атмосферой (ETo) и коэффициента культуры (Kcb). При

этом относительная эвапотранспирация (ЕТо) рассчитывается по уравнению Пенман-Монтейт. Коэффициент культуры пропорционален накоплению прогнозной биомассы СС. При дефиците воды устьица листа закрываются, где коэффициент водного дефицита (Ks) затормаживает процесс транспирации. В результате, в зависимости от условий внешней среды, деятельность устьиц листа определяет уровень транспирации.

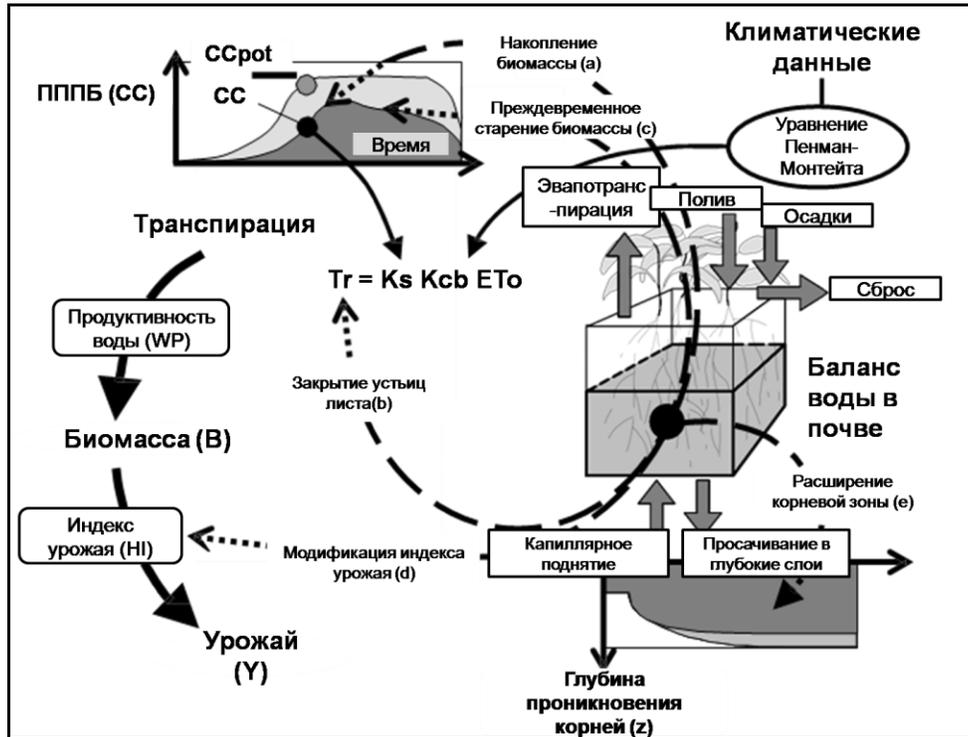


Рис. 4. Система расчётов в модели AquaCrop: пунктирные линии означают процессы условий (от a до e) водного стресса (СС – прогнозная биомасса растений, СС<sub>pot</sub> – потенциальная биомасса, Ks – коэффициент водного стресса, Kcb – коэффициент культуры, ЕТо – относительная эвапотранспирация, WP\* - оптимизированная продуктивность воды; HI – индекс урожая).

- *Надземная биомасса растений.* Кумулятивная транспирация (Tr) пропорционально конвертируется в накопленную биомассу растений. Продуктивность воды в модели AquaCrop оптимизируется для эвапотранспирации и количества CO<sub>2</sub>, которая достигается в оптимальных условиях почвы и растений. Это означает сильную зависимость между накоплением биомассы растениями и транспирацией. При этом, урожай показывается в отделенном виде от общей биомассы, тогда как последняя не разделяется на другие части.

- *Разделение урожая (Y) от общей надземной массы растений.* В модели урожай культуры рассчитывается через индекс урожая и симулированную надземную биомассу растений. Индекс урожая (HI) модифицируется в процессе накопления урожая, в зависимости от температуры воды и/или воздуха.

### 3. Этапы симуляции

*Первый этап: симуляция баланса воды в почве.* Корнеобитаемый слой почвы схематично можно считать «резервуаром» (Рис. 5).

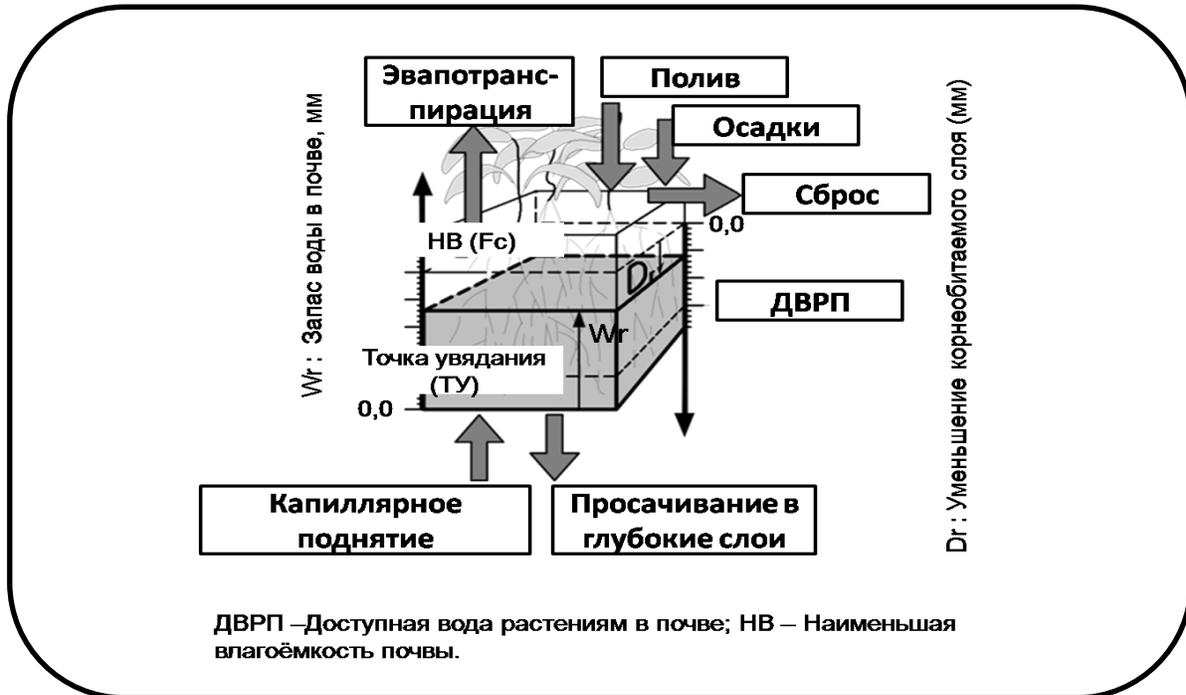


Рис 5. Корнеобитаемый слой как “резервуар”

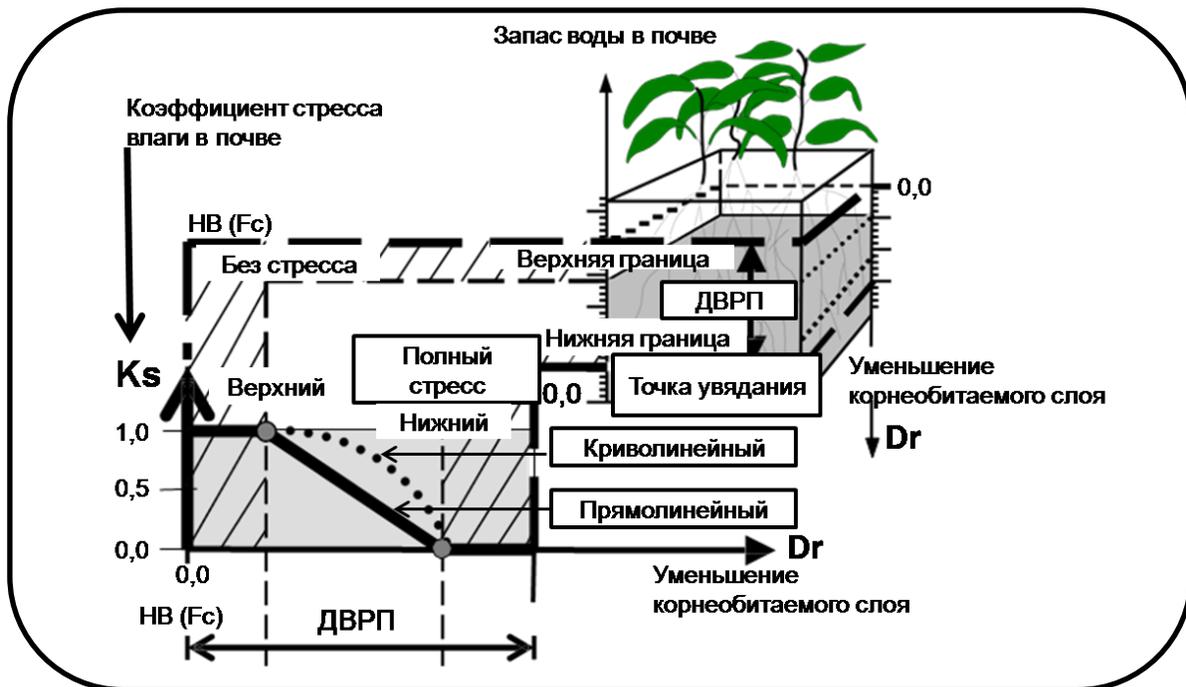


Рис. 6. Коэффициент водного стресса ( $K_s$ ) при различной влажности почвы

В период вегетации растений можно рассчитать количество воды в корнеобитаемом слое почвы путем учёта приходных (поливы, осадки и капиллярное поднятие) и расходных статей (эвапотранспирация, сброс, просачивание в глубокие слои почвы).

Модель AquaCrop делит горизонтальный слой почвы и время на мелкие части с целью характеристики сброса, количества просачившей воды в почву, динамики воды и солей, а также характеристики расхода на транспирацию и испарение. Симуляция осуществляется в суточном режиме ( $\Delta t$ ) и горизонт почвы подразделяется на 12 слоев ( $\Delta z$ ), они модифицируются с целью наиболее полного охвата корнеобитаемого слоя почвы.

Влияние дефицита воды характеризуется коэффициентом водного стресса. Последний не наблюдается, если влажность корнеобитаемого слоя выше, чем наименьшая влагоёмкость (НВ) почвы. При содержании воды в почве ниже, чем точка увядания, то дефицит считается максимальным ( $K_s=0$ ) и все процессы прекращаются (Рис. 6). Для каждого этапа процесса предусмотрены нижняя и верхняя граница, а также соответствующие коэффициенты стресса, так как влияние водного стресса на процессы, протекающие в растении, может быть разным.

**Второй этап: симуляция развития зелёной биомассы растений.** В отличие от других моделей, AquaCrop, вместо индекса листовой поверхности, использует показатель ПППБ (покрытие поверхности почвы биомассой) или СС (на английском языке). Он применяется для характеристики развития надземной биомассы в период вегетации растений (Рис. 7).

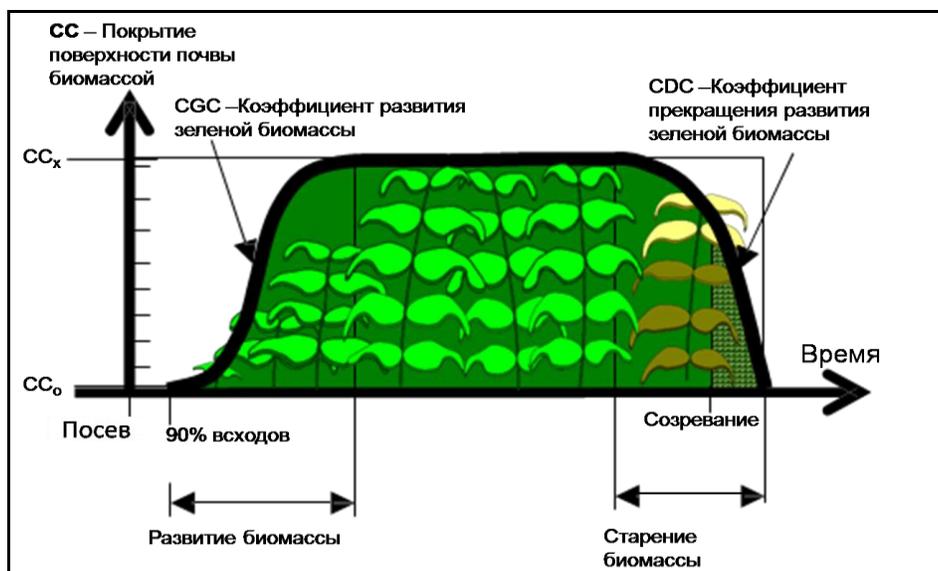


Рис. 7. Развитие надземной биомассы в период вегетации растений в оптимальных условиях

Развитие биомассы растений в оптимальных условиях характеризуется несколькими параметрами:

- покрытие поверхности почвы биомассой растений при появлении 90% всходов (СС<sub>0</sub>);
- покрытие поверхности почвы биомассой при максимальном накоплении надземной биомассы растениями (СС<sub>x</sub>);
- коэффициент развития биомассы (CGC) характеризует накопление биомассы растениями в период «всходы – максимальное накопление биомассы»;
- коэффициент уменьшения биомассы (CDC) характеризует уменьшение биомассы в период созревания урожая в связи со старением листьев.

Симуляция влияния водного стресса на биомассу растений определяется произведением коэффициентов развития биомассы (CGC) и водного стресса ( $K_{sexp,w}$  - для развития биомассы). При уменьшении содержания воды в корнеобитаемом слое и снижении влажности в почве ниже нижней границы, жизненно важные процессы в растительном организме затухают полностью, так как  $K_{sexp,w} = 0$  (Рис. 6).

В этом случае, развитие биомассы может протекать иначе, чем как показано на рис. 7. В сравнении с оптимальными условиями, при дефиците воды наблюдается преждевременное старение биомассы, что сокращает вегетационный период растений. Симуляция развития надземной зелёной биомассы растений при условии водного дефицита показана на рис. 8.

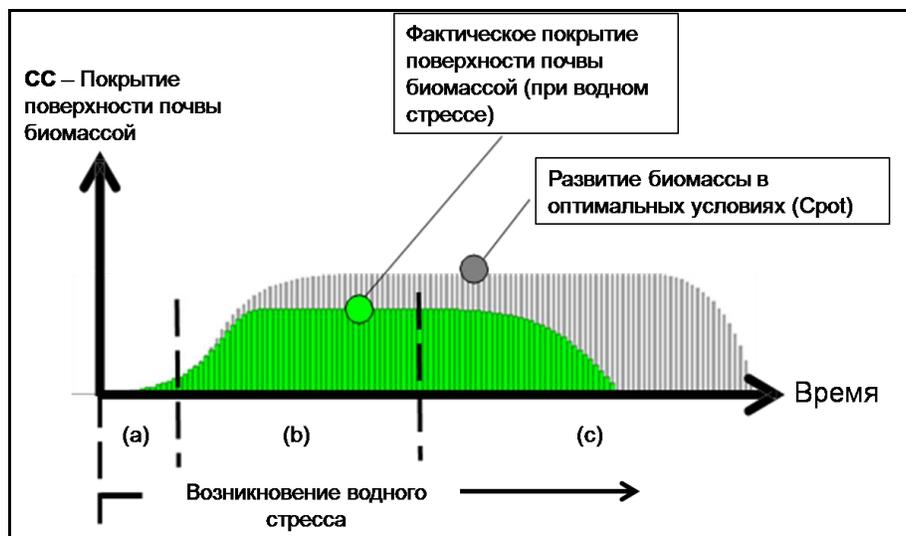


Рис. 8. Развитие надземной биомассы в период вегетации растений в условиях водного дефицита (в сравнении с биомассой растений, выращенных в оптимальных условиях)

Другие виды почвенно-экологических стрессов, принимаемые во внимание в модели AquaCrop:

- *стресс температуры воздуха.* Симуляция влияния температуры воздуха на развитие биомассы растений осуществляется с использованием показателя как сумма температур (GDD – Growing Degree Days, его расчёт показан в следующем разделе данной брошюры). Для этого необходимы такие температурные показатели воздуха как среднесуточная базовая ( $t^0$  – при температурах ниже базовой растение не развивается) и среднесуточная максимальная температура ( $t^{\max}$  – температуры выше максимальной оказывают отрицательное влияние на растения);
- *стресс почвенного засоления.* Растворимые в воде соли повышают водный стресс, так как почвенное засоление затрудняет усвоение растениями влаги из почвы. В модели этот момент симулируется путём сближения к НВ почвы верхней и нижней границ стресса (рис. 6).
- *стресс питательных веществ.* AquaCrop не симулирует круговорот и баланс питательных элементов растений. Однако для процессов роста и накопления биомассы растений модель использует коэффициент плодородия почвы ( $K_s$ ). Вместе с тем, в модель введена разница между коэффициентом плодородия почвы ( $K_{s,exp,f}$ ) для роста листьев, которая ограничивается коэффициентом развития зелёной биомассы (CGC), и коэффициентом максимальной биомассы, которая контролирует накопление биомассы растений (CCx). Модель способна симулировать последующее стабильное уменьшение биомассы растений после предварительного её максимума (Рис. 9). Суточное уменьшение биомассы растений выражается снижающим фактором ( $f_{CD}$ Decline).

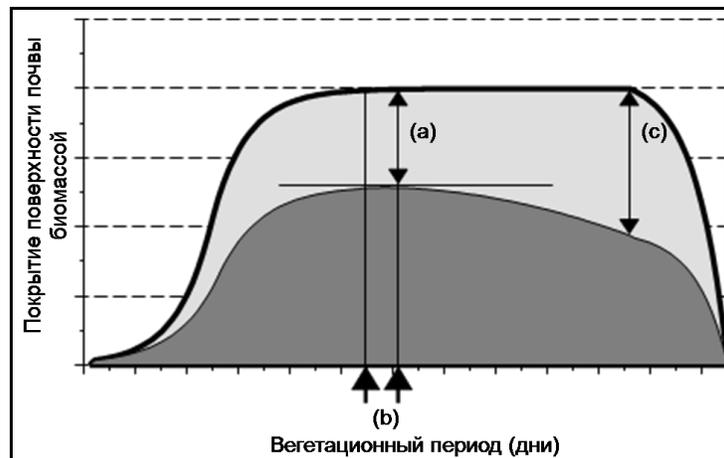


Рис. 9. Развитие зелёной биомассы растений, если почвенное плодородие является (тёмно-серый цвет) и не является (светло-серый цвет) органичивающим фактором

**Третий этап: симуляция транспирации.** С учётом водного стресса ( $K_s$ ), транспирация растениями ( $T_r$ ) рассчитывается как произведение потенциала испарения воды атмосферой и коэффициента культуры ( $K_{cb}$ ):

$$T_r = K_s(K_{cb}CC^*)ET_o \quad [3]$$

Относительная эвапотранспирация ( $ET_o$ ) рассчитывается по уравнению Пенман-Монтейт (Allen et al. 1998). Коэффициент транспирации культуры пропорционален фракционированной биомассе растений ( $CC$ ). Фактор пропорциональности ( $K_{cbx}$ ) взаимно интегрирует все влияния, характеризующие относительную транспирацию с поверхности травы. С развитием растений  $K_{cbx}$  модифицирует периоды роста и старения биомассы. В уравнении Eq [3] вместо  $CC$  введено  $CC^*$ , где учитывается микроадвекция между рядками, вследствие образования дополнительной энергии для транспирации. Доля этого показателя возрастает при недостаточном покрытии поверхности почвы биомассой растений (Рис. 10).

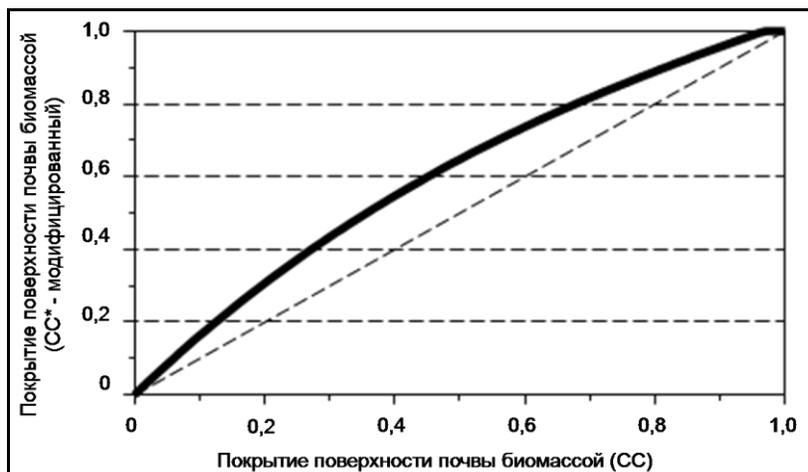


Рис. 10. Модифицированная биомасса растений с учётом микроадвекции (сплошная линия) для покрытия поверхности почвы зелёной биомассой растений

Интенсивность транспирации снижается при уменьшении или увеличении влажности почвы. Это симулируется коэффициентом водного стресса ( $K_s$ ). Если влажность корнеобитаемого слоя почвы уменьшается, и устьица листьев закрываются, то это симулируется коэффициентом закрытия устьиц ( $K_{ssto}$ ). В модели также есть специальный коэффициент ( $K_{saer}$ ) на случай анаэробных условий, в связи с чрезмерной влажностью почвы.

В соответствии с основным правилом модели AquaCrop, при оптимальной влажности почвы коэффициент водного дефицита равен единице (1,0), при остром дефиците воды он равен нулю (0,0). Симуляция транспирации при дефиците воды в период вегетации растений продемонстрирована на рис. 11.

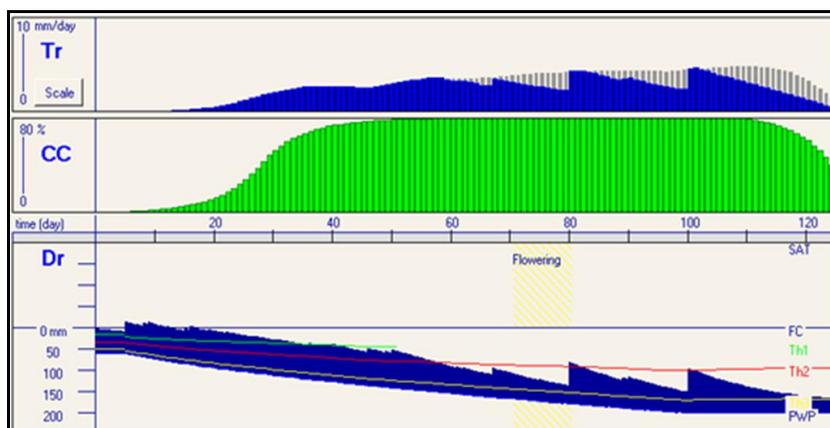


Рис. 11. Уменьшение симулированной влажности в корнеобитаемом слое почвы (Dr), накопление зелёной биомассы (CC) и транспирация (Tr): влияние границ влажности почвы на развитие биомассы (Th1), закрытие устьиц листьев (Th2) и старение биомассы растений (Th3)

**Четвёртый этап: симуляция надземной биомассы растений (B).** Продуктивность воды (г, кг) означает количество произведенной биомассы с единицы площади ( $m^2$  или га) за счёт определённого количества транспирации воды растениями. Как показывают результаты многочисленных исследований, между биомассой и количеством воды, использованной растениями, существует прямая коррелятивная зависимость (Eq [2]). С целью принятия во внимание климатических условий, AquaCrop использует показатель модифицированной продуктивности воды ( $WP^*$ ). Это обусловлено тем, что показатель  $WP^*$  можно использовать в различных почвенно-климатических условиях (с учётом изменений климата). Модификация в данном случае означает:

- продуктивность воды в растениях при содержании в атмосфере  $CO_2$  равной 369,41 ppm (данные обсерватории Мауна Лоа в Гавайях за 2000 год);
- потенциал испарения воды атмосферой. В данном случае модификация выполняется путем деления суточной транспирации (Tr) на размер относительной эвапотранспирации ( $ETo$ ) за тот же день. После модификации показателя  $WP^*$  появилась возможность

разделения с/х культур на две группы (Рис.12): для культур C<sub>4</sub><sup>2</sup> WP\* = 30-35 г/м<sup>2</sup> или 0,30-0,35 т/га; для C<sub>3</sub> культур WP\* = 15-20 г/м<sup>2</sup> или 0,15-0,20 т/га.

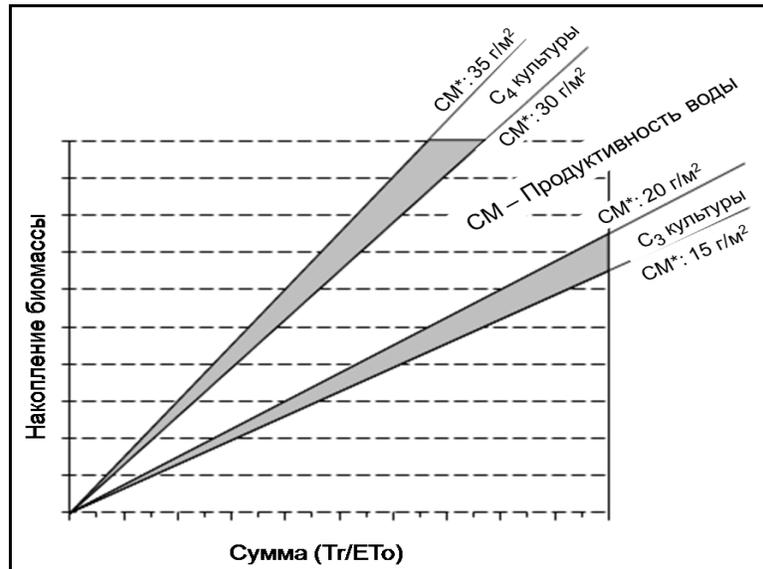


Рис. 12. Зависимость между количеством транспирации воды растениями и надземной биомассой растений для культур C<sub>3</sub> и C<sub>4</sub> групп

В период вегетации накопление дневной биомассы рассчитывается как произведение показателей WP\* и Tr/ETo. На накопление биомассы растениями может оказать влияние пониженная температура воздуха. В модели это принимается во внимание с помощью коэффициента (Ksb) температурного стресса (Eq [4]):

$$B = K_{sb} WP^* \sum_i \frac{Tr_i}{ET_{oi}} \quad [4]$$

Если температура воздуха ниже, чем нижний предел, тогда транспирация не полностью характеризуется накоплением биомассы и  $K_{sb} < 1$ . Симулированное накопление биомассы в период вегетации растений представлено на рис. 13.

Показатель WP\* может быть модифицирован далее во время симуляций, если:

- содержание CO<sub>2</sub> в атмосфере выше или ниже относительного показателя (369,41 ppm), тогда показатель WP\* умножается на модифицирующий фактор, который может быть больше или меньше единицы в зависимости от содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере;

<sup>2</sup>На культурах C<sub>3</sub> и C<sub>4</sub> групп процесс фотосинтеза протекает по-разному (C<sub>3</sub> – трёхуглеродные кислоты, C<sub>4</sub> – четырёхуглеродные кислоты).

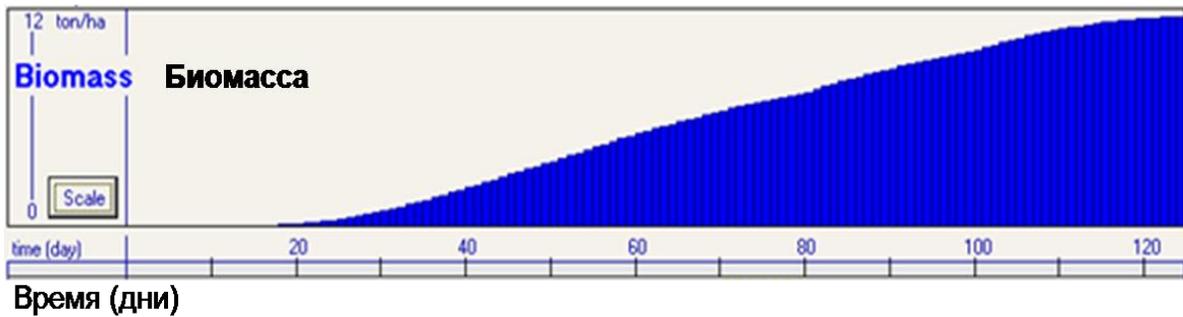


Рис. 13. Симуляция накопления биомассы в период вегетации растений

- зависит от вида растениеводческой продукции: если урожай богат липидами или протеином, в сравнении с углеводами, тогда на формирование органической массы расходуется много энергии. В результате, необходимо уменьшить показатель продуктивности воды в период формирования урожая. Во время симуляции это можно сделать путем умножения показателя  $WP^*$  на понижающий коэффициент;
- продуктивность воды культуры снижается вследствие стресса почвенного плодородия, тогда при симуляции следует использовать коэффициент стресса плодородия почвы ( $K_{SWP}$  = от 0 до 1). Если плодородие почвы не оказывает влияние на накопление биомассы растениями, то  $K_{SWP} = 1$  и показатель  $WP^*$  не модифицируется.

**Пятый этап: определение урожайности культуры (Y) по общей биомассе (B).** Индекс урожая (HI) значительно возрастает с фазы цветения растений, так как к моменту созревания урожая показатель HI должен достигнуть своего относительного индекса (HI<sub>o</sub>) урожая (Рис. 14). Преждевременное старение биомассы приводит к сокращению процессов фотосинтеза и формированию урожая (например, налив зерна у зерновых) культуры в более краткие сроки. Это, в свою очередь, способствует снижению индекса урожая культуры. У раннеспелых овощных культур индекс урожая формируется в ранние сроки вегетации, тогда HI догоняет HI<sub>o</sub> в кратчайшие сроки.

Урожай культуры (Y) определяется как произведение надземной биомассы растений (B) и модифицированного относительного индекса:

$$Y = f_{HI} HI_o B \quad [5]$$

Где,  $f_{HI}$  – коэффициент, учитывающий стресс путем модификации индекса урожая от его относительного индекса.

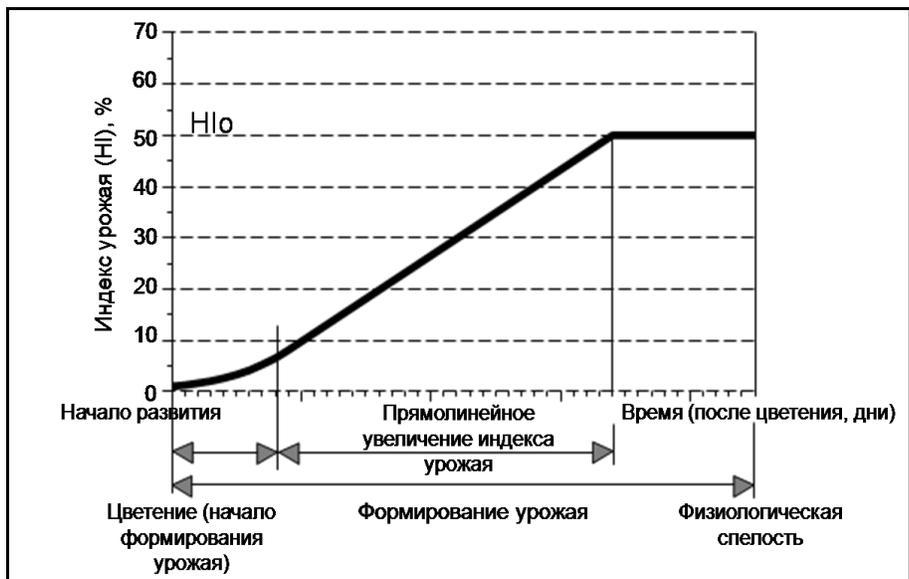


Рис. 14. Формирование индекса урожая в период «цветение – физиологическая спелость урожая»

Модификация индекса урожая относительно водного стресса и температуры воздуха зависит от продолжительности стресса. Влияние водного на индекс урожая может быть положительным или отрицательным. Поэтому, определена разница в связи с наступлением срока водного дефицита – (i) в период цветения, так как это может оказать влияние на опыление, и (ii) в период формирования урожая.

#### 4. Набор данных для введения в модель

Модель AquaCrop начинается со следующего вида на мониторе и кнопки “Start” (Рис. 15). Первоначально, для проверки правильности работы модели проводится его параметризация. Для этого используется набор данных для конкретной сельскохозяйственной культуры и почвенно-климатических условий. Эти данные должны быть для условий, где культура выращена с применением оптимальной агротехнологии.

В модель AquaCrop вводятся данные по климату, культуре и почве. Также вводится информация, характеризующая среду (сюда же входят агротехнологические мероприятия) возделываемой культуры.

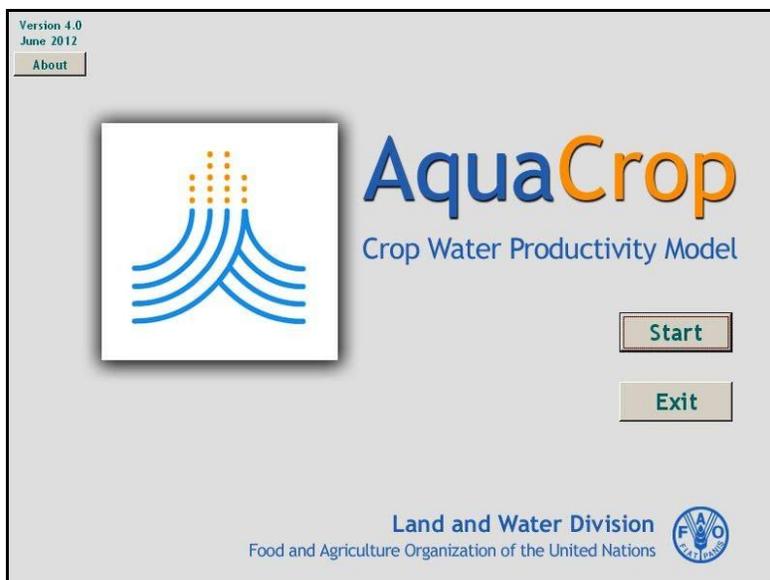


Рис. 15. Начало работы в модели AquaCrop

Данные, вводимые в модель, сохраняются в соответствующих файлах, легко управляются и модифицируются с помощью интерфейса пользователя (Рис. 16).

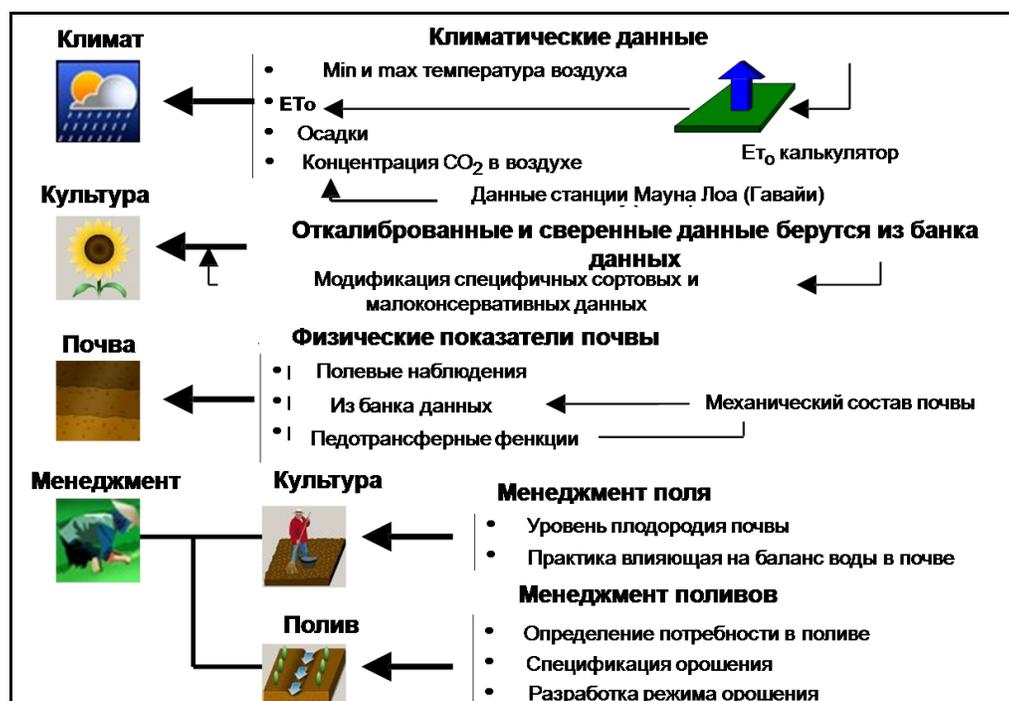


Рис. 16. Набор данных для введения в модель AquaCrop

## 4.1 Климатические данные

Для введения в модель используются климатические данные с метеостанции, установленной непосредственно на опытном поле, или близлежащей метеостанции. Для всего периода симуляции (прогноза) в модель вводятся следующие суточные (за 24 часа) климатические данные: минимальная и максимальная температура воздуха, относительная эвапотранспирация, осадки и содержание  $\text{CO}_2$  в воздухе. Данные по концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе имеются в базе данных AquaCrop (Climate → Create Climate file → MaunaLoa.CO2: Default atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration from 1902 to 2099).

Суточные данные по количеству осадков, температуре воздуха ( $T_{min}$  и  $T_{max}$ ) подготовливаются в соответствующем формате (форма файла – Блокнот “PLU” для осадков; Блокнот “TMP” для температуры воздуха; Блокнот “ETO” для относительной транспирации) и вводятся в базу данных модели (эти данные в нужном формате приведены в приложениях 1, 2 и 3 в сокращенном виде). На основании файлов по минимальной и максимальной температуре воздуха, относительной эвапотранспирации, осадкам и содержанию  $\text{CO}_2$  в воздухе создается единый файл по климату (Рис. 17).

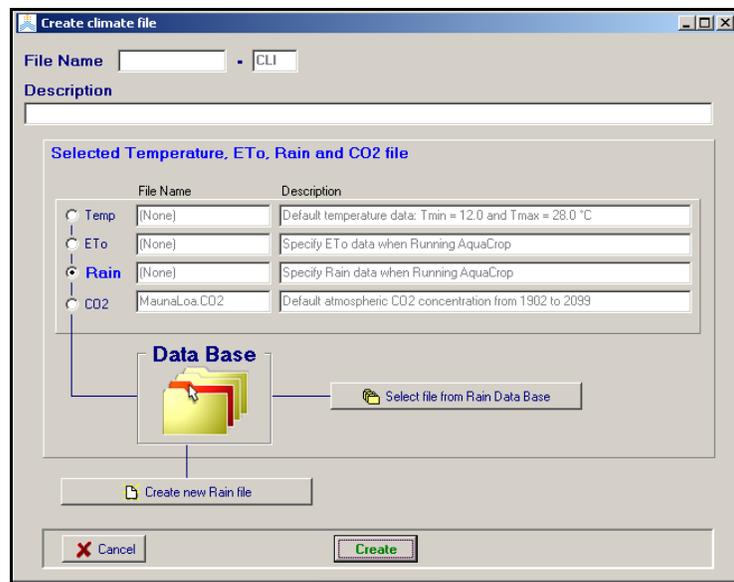


Рис 17. Файл по климату  
(температура воздуха, осадки, относительная ETo и концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе)

*Относительная (эталонная) эвапотранспирация (ETo).* Многие метеорологические станции, используемые в научно-исследовательских работах, рассчитывают относительную эвапотранспирацию автоматически, используя климатические данные. Для этого в программе этих

метеостанций (data logger), кроме других параметров климата, следует отметить также измерение относительной эвапотранспирации (ЕТо).

Относительную эвапотранспирацию можно измерить или рассчитать эмпирически, с помощью уравнений. Для прямого измерения ЕТо используются различные испарители или лизиметры, её также можно измерить приложением методов теплового баланса или турбулентной диффузии. Эмпирически относительная эвапотранспирация рассчитывается по формуле Пенман-Монтейт (Allen et al. 1998):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad [6]$$

Где,

- ЕТо - относительная эвапотранспирация [мм/день];
- $R_n$  - чистая радиация [МДж м<sup>2</sup>/день];
- $G$  - плотность потока почвенной теплоты [МДж/м<sup>2</sup>/день];
- $T$  - средняя температура воздуха на высоте 2 м над землей [°C];
- $u_2$  - средняя скорость ветра на высоте 2 м над землей [м/с];
- $e_s$  - давление насыщенного пара [кПа];
- $e_a$  - фактическое давление [кПа];
- $(e_s - e_a)$  - дефицит давления насыщенного пара [кПа];
- $\Delta$  - градиент кривой давления пара [кПа/°C];
- $\gamma$  - психрометрический постоянный показатель [кПа/°C].

Для расчёта суточной ЕТо необходимы следующие данные: минимальная ( $T_{\min}$ ) и максимальная ( $T_{\max}$ ) температура воздуха (°C), минимальная ( $RH_{\min}$ ) и максимальная ( $RH_{\max}$ ) влажность воздуха (%), скорость ветра на высоте 2 м над землей (m/s), солнечная или коротковолновая радиация ( $W/m^2$ ). С помощью этих данных и используя соответствующие руководства (например “The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation, 2005”) можно рассчитать другие показатели, приведенные в уравнении Eq [4] или применить непосредственно ЕТо калькулятор (например “FAO Reference ETo Calculator”, “Bushland Reference ETo Calculator”). При отсутствии какого-либо параметра указанного выше, его можно рассчитать относительно. Например, если не были проведены измерения солнечной или коротковолновой радиация, то это можно рассчитать по уравнению [Eq 7] Hargreaves-Samani (ASCE, 2005):

$$R_s = k_{RS} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad [7]$$

Где,

- $R_a$  - экстратеррестриальная радиация [МДж/м<sup>2</sup>/день];
- $T_{max}$  - максимальная температура воздуха [°C]
- $T_{min}$  - минимальная температура воздуха [°C]
- $k_{RS}$  - оптимизирующий коэффициент:  $k_{RS}=0,16$  если близлежащая водная акватория не оказывает на поле и воздушную массу,  $k_{RS}=0,19$  если оказывает действие (в основном прибрежная зона)

Данные, в созданном климатическом файле, можно проверить последующим нажатием кнопок “*Display/Update Climate characteristics*” в интерфейсе пользователя (Рис. 18).

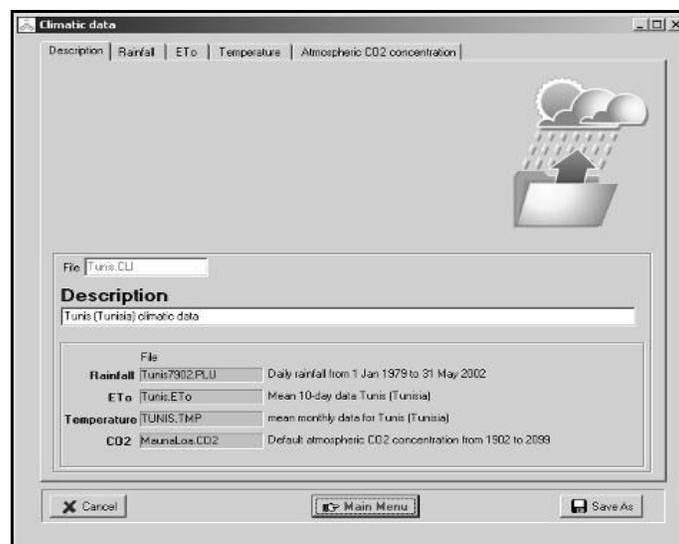


Рис. 18. Вид файла по климату, созданный пользователем в модели

## 4.2 Данные по сельскохозяйственной культуре

Информация по сельскохозяйственной культуре считается важной частью модели, так как включает в себя данные по фенологии, транспирации, накоплению биомассы растениями, стрессам. Данные по культуре вводятся в AquaСтор напрямую.

Для создания этого файла отмечается вид сельскохозяйственной культуры (принадлежность к группе С3 или С4, зерновые, овощные и другие), вегетационный период, сев семенами или посадка рассады, период симуляции и другие параметры.

Затем даётся имя файлу (File Name) сельскохозяйственной культуры и понятная краткая характеристика (Description), он создаётся нажатием кнопки “Create” (Рис. 19).

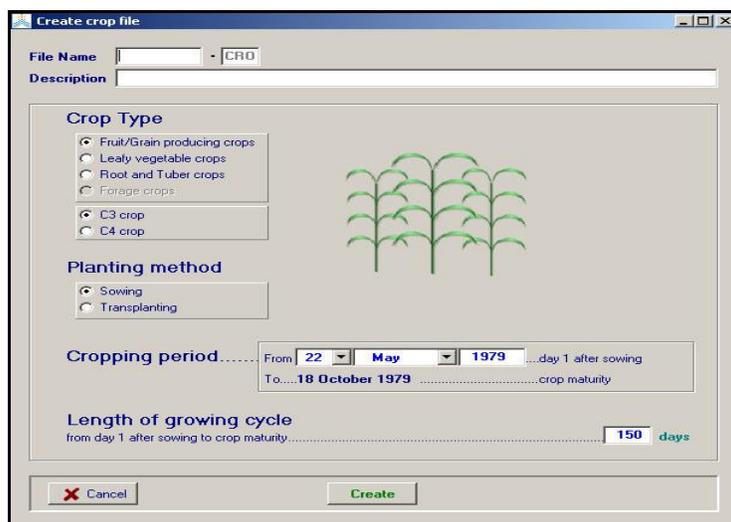


Рис. 19. Вид файла сельскохозяйственной культуры в модели AquaCrop

В свою очередь на мониторе появляется другой вид (Рис. 20). В нём пользователь указывает, какие данные будут введены в модель: Full Set (все запрашиваемые данные) или Limited set (ограниченный набор данных, такие как рост, развитие и урожай).

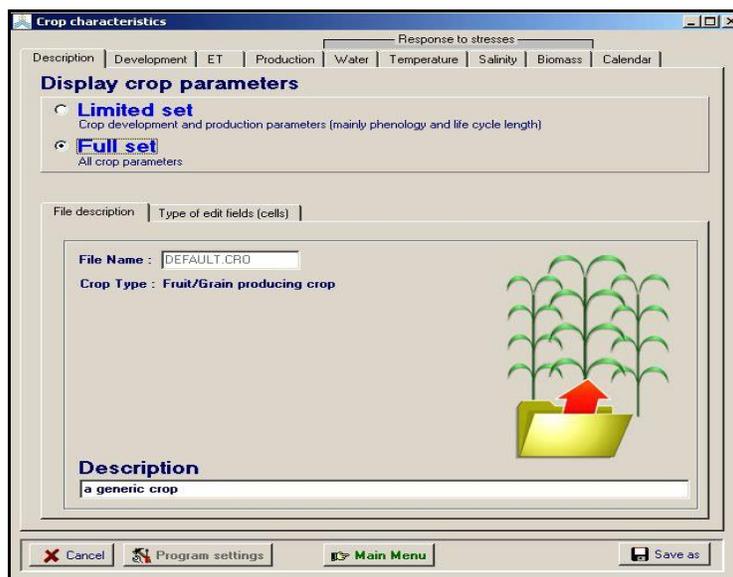


Рис. 20. Введение полного (Full Set) и ограниченного (Limited set) набора данных в файл с/х культуры

Следующий вид (Рис. 21) включает в себя соответствующие разделы (Development – Развитие растений, ET – Водопотребление растений, Production – выращивание и другие) и подразделы (например в разделе Development : Initial Canopy Cover, Canopy Development, Flowering and Yield Formation и другие).

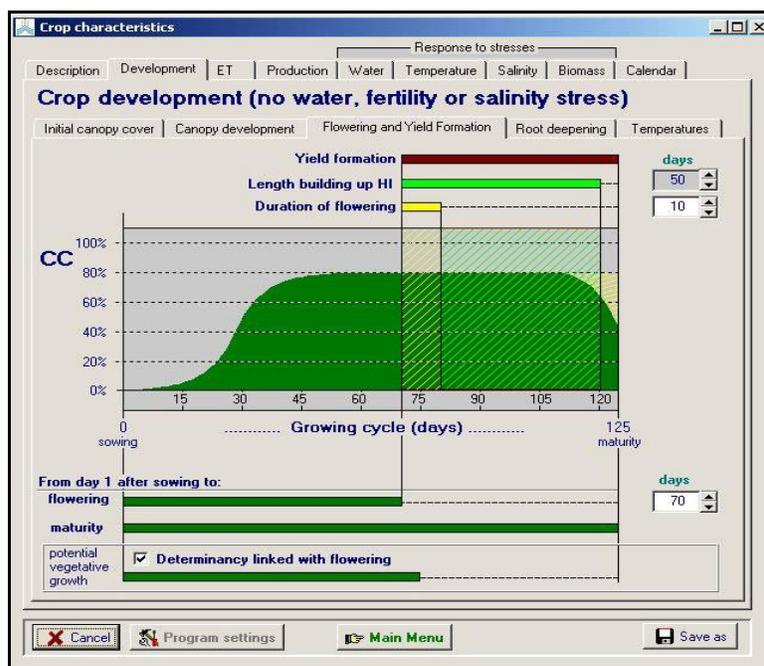


Рис. 21. Вид файла культуры с разделами и подразделами

В эти разделы и подразделы файла сельскохозяйственной культуры один за другим вводятся соответствующие данные. Некоторые из них приведены в руководстве по использованию модели AquaCrop (Raes et al., 2010). Например, для хлопчатника и пшеницы рекомендовано введение в модель следующих показателей (Табл. 1). Данные по хлопчатнику, которые были введены в модель в качестве примера, приведены в приложении 4.

В этой таблице: (1) консервативный (показатель не изменчив в условиях почв, климата, сорта и прочее); (2) консервативный для конкретной культуры, но может меняться по сортам; (3) зависит от почвенно-экологических условий; (4) присущ конкретному сорту. При этом, показатель, указанный как «консервативный», определен специалистами ФАО на основании результатов многочисленных опытов, проведенных в различных почвенно-климатических условиях мира. Поэтому, подобные данные вводятся в модель напрямую, без модификации. Показатели, указанные в таблице как «Сорт» и «Агротехника» берутся и вводятся в модель из результатов

научных исследований, проведенных в соответствующих почвенных и климатических условиях, или из «банка данных».

Таблица 1

Набор данных вводимых в файл сельскохозяйственной культуры для параметризации модели AquaCrop (Raes et al., 2010)

<b>Хлопчатник</b>			
<b>1. Фенологические данные</b>			
<b>Сокращения</b>	<b>Характеристика показателя</b>	<b>Вид параметра</b>	<b>Показатель для введения в модель</b>
<i>1.1 Температура воздуха</i>			
T <sub>base</sub>	Минимальная температура воздуха (°C)	Консервативный <sup>(1)</sup>	12,0
T <sub>upper</sub>	Максимальная температура воздуха (°C)	Консервативный <sup>(1)</sup>	35,0
<i>1.2 Накопление зелёной биомассы</i>			
	Покрытие поверхности почвы единичными проростками при появлении 90% всходов (см <sup>2</sup> /растение)	Консервативный <sup>(2)</sup>	5,00-7,00
	Густота стояния растений	Агротехника <sup>(3)</sup>	60000-150000
	Необходимая эффективная температура воздуха в период «посев - всходы» (в GDD)	Агротехника <sup>(3)</sup>	10-80
CGC	Коэффициент формирования биомассы (фракция относительно GDD)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,006-0,008
	Максимальное покрытие поверхности земли биомассой (%)	Агротехника <sup>(3)</sup>	Почти покрыт - Покрыт
	Время необходимое для периода «посев – старение растения» (в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	+ 1000 - 1800
CDC	Коэффициент уменьшения биомассы (фракция относительно GDD)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,002-0,003
	Длина вегетационного периода (в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	+ 1200 – 2000
<i>1.3 Цветение культуры</i>			
	Время для периода «посев – цветение» (в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	+ 450 – 700
	Продолжительность периода цветения (в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	450 – 700
	Завершение формирования новых коробочек на растениях в связи с цветением	Консервативный <sup>(1)</sup>	-
	Целостность формируемых коробочек	Консервативный <sup>(2)</sup>	Высокая
<i>1.4 Развитие корня</i>			
Z <sub>n</sub>	Минимальная глубина распространения корней (м)	Агротехника <sup>(3)</sup>	0,30

<i>продолжение таблицы 1</i>			
Z <sub>x</sub>	Максимальная глубина распространения корней (м)	Агротехника <sup>(3)</sup>	До 2,80 м
	Фактор, характеризующий зону распространения корней	Консервативный <sup>(1)</sup>	1,5
	Время, необходимое после сева для развития корней на максимальную глубину (GDD)	Сорт <sup>(4)</sup> Почвенно-экологические условия <sup>(3)</sup>	Функция скорости развития корней: 1,5 – 2,5 см/день
<b>2. Транспирация</b>			
K <sub>cbx</sub>	Коэффициент культуры при максимальной биомассе (до старения растений)	Консервативный <sup>(1)</sup>	1,10
	Снижение коэффициента культуры в связи с дефицитом азота или вегетацией растения	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,30
	Влияние биомассы растений на испарение из почвы к концу вегетационного периода	Консервативный <sup>(1)</sup>	60
<b>3. Накопление биомассы и формирование урожая</b>			
<i>3.1 Продуктивность воды культуры</i>			
WP*	Оптимизированная продуктивность воды для ET <sub>o</sub> и CO <sub>2</sub> (г/м <sup>2</sup> )	Консервативный <sup>(1)</sup>	15,0
	Оптимизированная продуктивность воды для ET <sub>o</sub> и CO <sub>2</sub> в период формирования урожая	Консервативный <sup>(1)</sup>	70
<i>3.2 Индекс урожая</i>			
HI <sub>o</sub>	Относительный индекс урожая (%)	Сорт <sup>(4)</sup>	25-40
	Формирование индекса урожая (период в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	До тех пор, пока на кусте не останется 5% зелёной биомассы
	Увеличение индекса урожая в связи с возможным дефицитом воды до цветения растений	Консервативный <sup>(1)</sup>	Низкий
	Коэффициент, характеризующий отрицательное влияние закрытия устьиц листьев на индекс урожая в период накопления урожая	Консервативный <sup>(1)</sup>	Средний
	Коэффициент, характеризующий положительное влияние ограничения чрезмерного вегетативный роста на индекс урожая в период накопления урожая	Консервативный <sup>(1)</sup>	Низкий

<i>продолжение таблицы 1</i>			
	Возможное увеличение индекса урожая (%)	Консервативный <sup>(1)</sup>	30
<b>4. Стресс</b>			
<i>4.1. От влажности почвы</i>			
$P_{exp, lower}$	Граница снижения влажности почвы для накопления биомассы растениями (верхняя граница)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,20
$P_{exp, upper}$	Граница снижения влажности почвы для накопления биомассы растениями (нижняя граница)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,70
	Фактор, формирующий коэффициент водного стресса для накопления биомассы	Консервативный <sup>(1)</sup>	3,0
$P_{sto}$	Верхняя граница уменьшения влажности почвы для контроля открытия/закрытия устьиц листьев	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,65
	Фактор, формирующий коэффициент водного стресса для контроля открытия/закрытия устьиц листьев	Консервативный <sup>(1)</sup>	2,5
$P_{sen}$	Граница снижения влажности почвы (верхняя граница) после времени максимального накопления биомассы (в период старения листьев растения)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,75
	Фактор, формирующий коэффициент водного стресса после времени максимального накопления биомассы (в период старения листьев растения)	Консервативный <sup>(1)</sup>	2,5
	ЕТо в период стресса, до старения растений	Консервативный <sup>(1)</sup>	0
$P_{pol}$	Граница снижения влажности почвы (верхняя граница) для полного торможения опыления растений	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,85 (Приблизительно)
	Объём% в анаэробической точке (относительно насыщенного)	Сорт <sup>(4)</sup> Почвенно-экологические условия <sup>(3)</sup>	Среднеустойчив против застояния воды в поле
<i>4.2. От почвенного плодородия (требуется калибровка модели)</i>			
<i>4.3. От температуры воздуха</i>			
	Минимальная °С, ограничивающая опыление	Консервативный <sup>(1)</sup>	12,0
	Максимальная °С, ограничивающая опыление	Консервативный <sup>(1)</sup>	40-45
	Минимальная температура необходимая для формирования полной биомассы (°С/день)	Консервативный <sup>(1)</sup>	Не предусмотрена

продолжение таблицы 1

## Пшеница

### 1. Фенологические данные

Сокращения	Характеристика показателя	Вид параметра	Показатель для введения в модель
<i>1.1 Температура воздуха</i>			
T <sub>base</sub>	Минимальная температура воздуха (°C)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,0
T <sub>upper</sub>	Максимальная температура воздуха (°C)	Консервативный <sup>(1)</sup>	26,0
<i>1.2 Накопление зелёной биомассы</i>			
	Покрытие поверхности почвы единичными проростками при появлении 90% всходов (см <sup>2</sup> /растение)	Консервативный <sup>(2)</sup>	1,50
	Густота стояния растений	Агротехника <sup>(3)</sup>	2000000-7000000
	Необходимая эффективная температура воздуха в период «посев - всходы» (в GDD)	Агротехника <sup>(3)</sup>	100-250
CGC	Коэффициент формирования биомассы (фракция относительно GDD)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,005-0,007
	Максимальное покрытие поверхности земли биомассой (%)	Агротехника <sup>(3)</sup>	Полностью покрыт
	Время необходимое для периода «посев – старение растения» (в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	+ 1000 - 2000
CDC	Коэффициент уменьшения биомассы (фракция относительно GDD)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,004
	Длина вегетационного периода (в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	+ 1500 - 2700
<i>1.3 Цветение культуры</i>			
	Время для периода «посев – цветение» (в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	+ 1000 - 1300
	Длительность периода цветения (в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	150 – 250
	Завершение формирования новых колосьев на растениях в связи с цветением	Консервативный <sup>(1)</sup>	Да
	Целостность формируемых колосьев	Консервативный <sup>(2)</sup>	Высокое
<i>1.4 Развитие корня</i>			
Z <sub>n</sub>	Минимальная глубина распространения корней (м)	Агротехника <sup>(3)</sup>	0,30
Z <sub>x</sub>	Максимальная глубина распространения корней (м)	Агротехника <sup>(3)</sup>	до 2,00 м

<i>продолжение таблицы 1</i>			
	Фактор, характеризующий зону распространения корней	Консервативный <sup>(1)</sup>	15
	Время, необходимое после сева для развития корней на максимальную глубину (GDD)	Сорт <sup>(4)</sup> Почвенно-экологические условия <sup>(3)</sup>	Функция скорости развития корней: 1,0 – 2,0 см/кун
<b>2. Транспирация</b>			
Kcb <sub>x</sub>	Коэффициент культуры при максимальной биомассе (до старения растений)	Консервативный <sup>(1)</sup>	1,10
	Снижение коэффициента культуры в связи с дефицитом азота или вегетацией растения	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,15
	Влияние биомассы растений на испарение из почвы к концу вегетационного периода	Консервативный <sup>(1)</sup>	50
<b>3. Накопление биомассы и формирование урожая</b>			
<i>3.1 Продуктивность воды культуры</i>			
WP*	Оптимизированная продуктивность воды для ET <sub>0</sub> и CO <sub>2</sub> (г/м <sup>2</sup> )	Консервативный <sup>(1)</sup>	15,0
	Оптимизированная продуктивность воды для ET <sub>0</sub> и CO <sub>2</sub> в период формирования урожая	Консервативный <sup>(1)</sup>	100
<i>3.2 Индекс урожая</i>			
HI <sub>0</sub>	Относительный индекс урожая (%)	Сорт <sup>(4)</sup>	45-50
	Формирование индекса урожая (период в GDD)	Сорт <sup>(4)</sup>	До тех пор, пока на растении не останется 15% зелёной биомассы
	Увеличение индекса урожая в связи с возможным дефицитом воды до цветения растений	Консервативный <sup>(1)</sup>	Низкое
	Коэффициент, характеризующий отрицательное влияние закрытия устьиц листьев на индекс урожая в период накопления урожая	Консервативный <sup>(1)</sup>	Низкий
	Коэффициент, характеризующий положительное влияние ограничения чрезмерного вегетативный роста на индекс урожая в период накопления урожая	Консервативный <sup>(1)</sup>	Средний
	Относительный индекс урожая (%)	Консервативный <sup>(1)</sup>	15

продолжение таблицы 1

#### 4. Стресс

##### 4.1 От влажности почвы

$P_{exp, lower}$	Граница снижения влажности почвы для накопления биомассы растениями (верхняя граница)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,20
$P_{exp, upper}$	Граница снижения влажности почвы для накопления биомассы растениями (нижняя граница)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,65
	Фактор, формирующий коэффициент водного стресса для накопления биомассы	Консервативный <sup>(1)</sup>	5,0
$P_{sto}$	Верхняя граница уменьшения влажности почвы для контроля открытия/закрытия устьев листьев	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,65
	Фактор, формирующий коэффициент водного стресса для контроля открытия/закрытия устьев листьев	Консервативный <sup>(1)</sup>	2,5
$P_{sen}$	Граница снижения влажности почвы (верхняя граница) после времени максимального накопления биомассы (в период старения листьев растения)	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,70
	Фактор, формирующий коэффициент водного стресса после времени максимального накопления биомассы (в период старения листьев растения)	Консервативный <sup>(1)</sup>	2,5
	ЕТо в период стресса, до старения растений	Консервативный <sup>(1)</sup>	0
$P_{pol}$	Граница снижения влажности почвы (верхняя граница) для полного торможения опыления растений	Консервативный <sup>(1)</sup>	0,85 (Приблизительный)
	Объём% в анаэробической точке (относительно насыщенного)	Сорт <sup>(4)</sup> Почвенно-экологические условия <sup>(3)</sup>	Среднеустойчив против застояния воды в поле

##### 4.2 От почвенного плодородия (требуется калибровка модели)

##### 4.3 От температуры воздуха

	Минимальная $^{\circ}C$ , ограничивающая опыление	Консервативный <sup>(1)</sup>	5,0
	Максимальная $^{\circ}C$ , ограничивающая опыление	Консервативный <sup>(1)</sup>	35
	Минимальная температура необходимая для формирования полной биомассы ( $^{\circ}C/день$ )	Консервативный <sup>(1)</sup>	13,0-15,0

Единицами измерений некоторых данных, вводимых в модель, являются дни или GDD (growing degree days – показатель, схожий с эффективной температурой). GDD рассчитывается по следующей формуле:

$$GDD = \left( \frac{t_{max}^0 - t_{min}^0}{2} \right) - t_{min}^0 \text{ для роста культуры} \quad [8]$$

Где,

$t_{max}^0$  – самая высокая температура в течении суток;

$t_{min}^0$  – самая низкая температура в течении суток;

минимальная температура ( $min t^0$ ) для роста культуры – например, для хлопчатника  $12^0C$ , пшеницы -  $0^0C$ .

Покрытие поверхности почвы биомассой растений (СС) можно рассчитать по данным площади листовой поверхности. При этом выбирается одна из наиболее подходящих формул, которые приведены ниже [9 или 10]:

$$CC = \frac{1 - e^{-LAI/1.3}}{1 + e^{-LAI/1.3}} \quad [9] \text{ (Garcia-Vila et al., 2009)}$$

Где,

$e^{-LAI}$  – экспоненциальный показатель площади листовой поверхности на площади  $1 \text{ м}^2$ .

$$CC = 1 - e^{(-\chi LAI)} \quad [10] \text{ (Farahani et al., 2009)}$$

Где,

$LAI \text{ (m}^2/\text{m}^2)$  – показатель площади листовой поверхности на площади  $1 \text{ м}^2$ ;

$\chi$  – коэффициент (для хлопчатника  $\chi = 0,77$ ).

Покрытие поверхности почвы биомассой растений (СС) можно рассчитать путем измерений фотосинтетически активной радиации (ФАР):

$$CC = \frac{1 - \text{ФАР}_{\text{нижний}}}{1 - \text{ФАР}_{\text{верхний}}} \quad [11] \text{ (Farahani et al., 2009)}$$

Где,

$\text{ФАР}_{\text{нижний}}$  – ФАР измерений в нижней части растения, близко к поверхности земли;

$\text{ФАР}_{\text{верхний}}$  – ФАР измерений сверху растения.

Для измерения фотосинтетически активной радиации можно использовать разные приборы (например AccuPAR LP-80), а измерения ФАР во избежание затенения растений проводятся, как правило, в полдень (около 12-13 часов дня).

Данные, введенные в файл сельскохозяйственной культуры, можно проверить и модифицировать в окне “*Crop characteristics*” после предварительного нажатия кнопки “*Display of crop characteristics*”.

Если данные для введения в модель по сельскохозяйственной культуре не приведены в руководстве по использованию AquaCrop или не установлены экспериментально для конкретных почвенно-климатических условий, то проводится калибровка модели. По отношению к параметризации, калибровка модели считается более высокой степенью.

### 4.3 Данные по орошению

Данные по орошению сельскохозяйственной культуры можно предварительно подготовить в соответствии с форматом (приложение 5) и ввести в базу данных модели или создать новый файл по орошению (интерфейс пользователя: *Irrigation* → *Select/Create Irrigation file* → *Create Irrigation file*). Этому файлу даётся соответствующее название (например, Cotton Irrigation Data 2015), в нём указывается способ полива (по бороздам, капельное, дождевание), также вводятся данные по нормам и срокам поливов, минерализации поливной воды (dS/m). Последовательным нажатием кнопок *Irrigation* → *Display/Update Irrigation file* в интерфейсе пользователя можно проверить и модифицировать данные по орошению культуры.

### 4.4 Полевые данные

Полевые данные необходимо предварительно подготовить в соответствии с форматом (приложение 6) и ввести в базу данных модели для последующего использования при симуляции (интерфейс пользователя: *Field* → *Select Field Management file*). Здесь показывается влияние уровня плодородия почвы на растения, выполнение мероприятий (мульчирование поверхности для снижения испарения из почвы, поделка гребней для сохранения почвенной влаги, предотвращение сброса поливной воды с поля) влияющих на баланс влаги в почве. Последовательным нажатием кнопок *Field* → *Display/Update Field Management file* в интерфейсе пользователя можно проверить и модифицировать данные по менеджменту поля.

## 4.5 Характеристика почвы

Почвенные данные также можно предварительно подготовить в соответствии с форматом (приложение 7) и ввести в базу данных модели или создать новый файл по почве (интерфейс пользователя: *Soil profile* → *Select/Create Soil profile file* → *Create Soil profile file*).

В этом файле приводятся данные по гидравлической характеристике почвы: гидравлическая проводимость почвы при насыщении ( $K_{sat}$ ), количество воды ( $\theta_{sat}$ ), влагоёмкость почвы ( $\theta_{FC}$ ) и постоянная точка завядания ( $\theta_{PWP}$ ) приводятся отдельно для каждого слоя почвы. Если эти данные имеются, то в этом файле определяется слой почвы (*Restrictive layer*), который ограничивает развитие корневой системы растения. К тому же, в файле указывается количество воды, которое может испариться из почвы (*REW - Readily Evaporable Water*) и осадки, в качестве сброса с поля (*CN - Curve Number*). В этом файле пользователь может привести механический состав по слоям почвы в соответствии с международной классификацией (например, *Clay Loam 19-73 см*). Последовательным нажатием кнопок *Soil profile* → *Display/Update Soil profile* в интерфейсе пользователя можно проверить и модифицировать почвенные данные.

## 4.6 Уровень грунтовых вод

В модели создается отдельный файл по грунтовой воде (интерфейс пользователя: *Groundwater* → *Select/Create Groundwater file* → *Create Groundwater file*). Файлу присваивается название (например, *Cotton.GWT*), в нём указывается уровень грунтовой воды и его минерализация, если грунтовая вода расположена близко к дневной поверхности почвы. При глубоком расположении грунтовой воды указывается, что она не оказывает влияние на баланс воды в почве. Последовательным нажатием кнопок *Groundwater* → *Display/Update Groundwater characteristics* в интерфейсе пользователя можно проверить и модифицировать данные по грунтовой воде.

## 5. Симуляция

**Период симуляции.** После введения всех данных в модель и нажатия кнопки “RUN” для прогнозирования эвапотранспирации, урожайности культуры и других параметров, на экране будет виден период симуляции. Его можно модифицировать на основе фактических данных по длине вегетационного периода сельскохозяйственной культуры.

**Исходное состояние почвы.** Влажность почвы, определенная в период сева культуры, играет очень важную роль, она оказывает влияние как на гидравлические свойства почвы, так развитие и урожайность культуры. В этой связи, в день посева или на следующий день после сева необходимо определять влажность в корнеобитаемом слое почвы. Как правило, эта глубина составляет 1,5 м, однако в зависимости от условий она может быть до 2,8 м. Файл с исходной влажностью почвы готовится в соответствии с установленным форматом (приложение 8) и вводится в базу данных модели. Пользователь может проверить и модифицировать данные по исходной влажности почвы последовательным нажатием следующих кнопок в интерфейсе: *Initial conditions* → *Display/Update initial conditions*.

Если влажность почвы в период сева культуры не была определена, то её можно модифицировать. Она должна быть модифицирована таким образом, чтобы разница между фактическим влагозапасом в корнеобитаемом слое почвы, определенный в первый срок после сева, и смоделированным влагозапасом на тот же срок не должна быть более чем 10 мм.

**Поливы до посева или после вегетации.** Если поливы проведены до сева культуры или после завершения вегетационного периода (*Irrigation events off-season*), то в модели есть возможность учёта этого (Рис. 22).

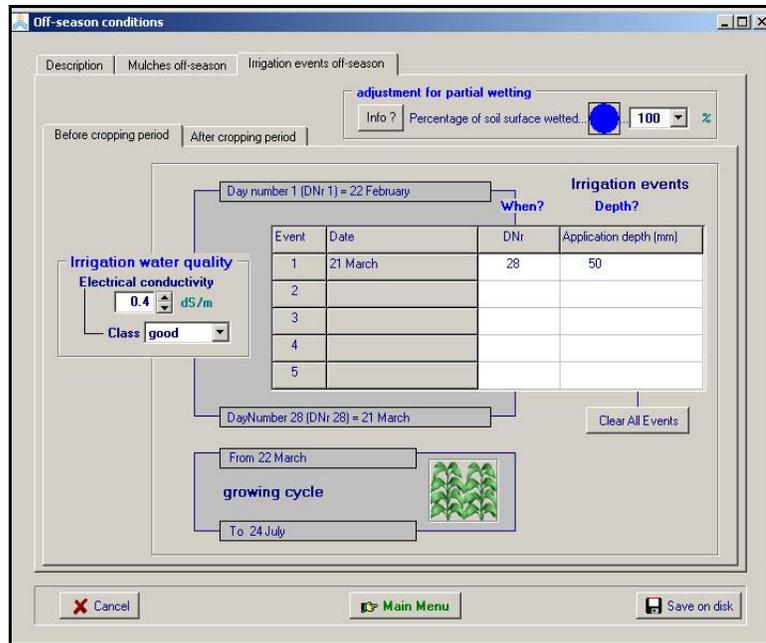


Рис. 22. Вид файла в модели для введения данных по поливам до посева культуры или после завершения вегетационного периода

**Создание отдельного проектного файла.** Нажатием кнопок *Project* → *Select/Create Project file* в интерфейсе пользователя можно создать новый «проектный файл» (*Create Project file*) или взять ранее созданный «проектный файл» из банка данных модели (Рис. 23).

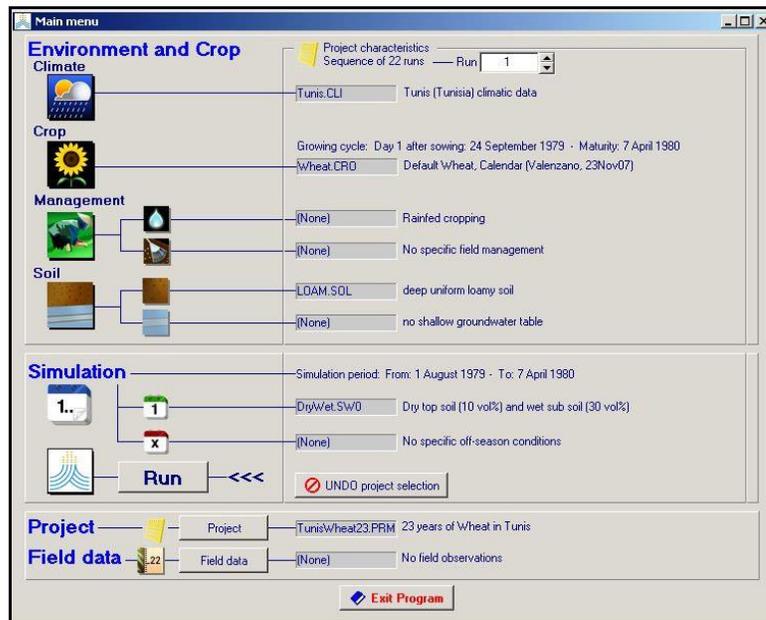


Рис. 23. Вид «Проектного файла» (*Project file*) созданного в модели

При создании «проектного файла» все описанные ранее данные (климат, культура, орошение, поле, почва, грунтовая вода, симуляционный период, исходное состояние) собираются в единый файл, который проименовывается и сохраняется в базе данных модели.

В «проектном файле» можно проверить и модифицировать входные данные последовательным нажатием кнопок “*Display of project characteristics*” ва “*Project characteristic*”. Однако не будет возможности модификации данных (так как не появляются кнопки управления “*Select/Create*” и “*Display/Update*”) по климату, культуре, орошению, полю, почве, грунтовой воде, симуляционному периоду, исходному состоянию почвы после выбора конкретного «проектного файла» для симуляции.

При создании «проектного файла» можно выбрать опции единичной симуляции (“*Single simulation run*”), где файл завершается расширением ‘PRO’, и множественной симуляции (“*Multiple run projects*”), где файл завершается расширением ‘PRM’. Последний (“*Multiple run projects*”) используется при симуляции севооборотов, влияния климата на развитие и продуктивность сельскохозяйственной культуры.

**Файл «Полевые данные».** Пользователь может создавать новый “*Field data*” файл или взять его из банка данных модели (если он был создан ранее) нажатием кнопок *Field data* → *Select/Create Field data* (Рис. 24).

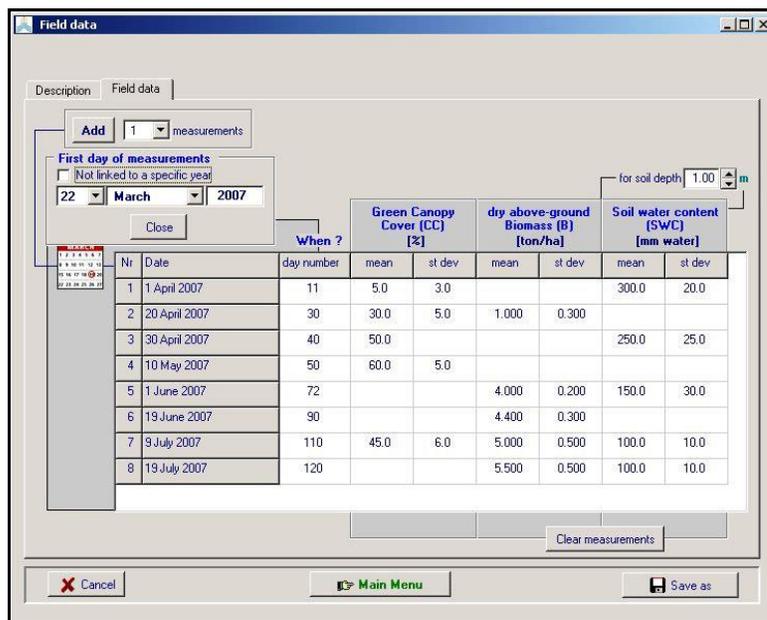


Рис. 24. Вид файла «Полевые данные» (*Field data*) созданного в модели

В файл «Полевые данные» вводятся результаты специальных измерений (определенная в конкретные дни надземная биомасса растений, динамика покрытия поверхности почвы растительной биомассой, влажность почвы и т. п.). Если подобные измерения были проведены во времени по повторениям опыты, то приводится их среднее значение и его стандартное отклонение.

## 6. Результаты симуляции

После введения, описанных выше данных (климат, культура, орошение, поле, почва, грунтовая вода, симуляционный период, исходное состояние почвы) в модель, в интерфейсе пользователя нажимаются кнопки “RUN”, а затем “Start” в появившемся окне монитора. Результаты симуляции (прогноза) имеют вид, как показано на рис. 25. Для облегчения анализа результатов симуляции некоторые из них приведены в графической форме. Кроме того, результаты каждого отдельного прогноза сохраняются (вид файла: Блокнот) в табличной форме в директории ‘Output’ модели (например приложения 9-10).

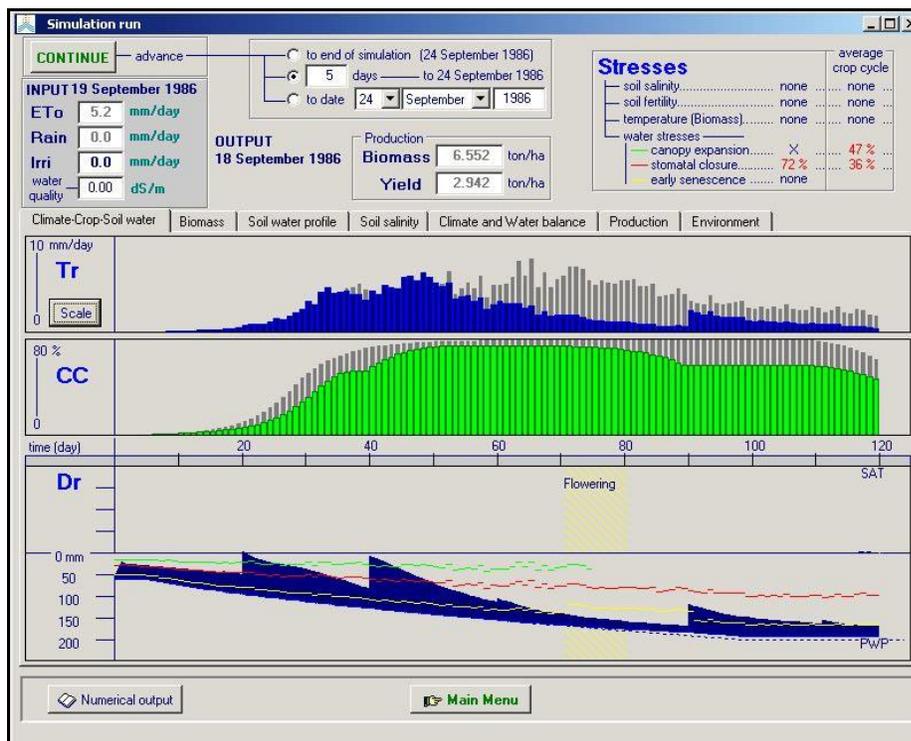
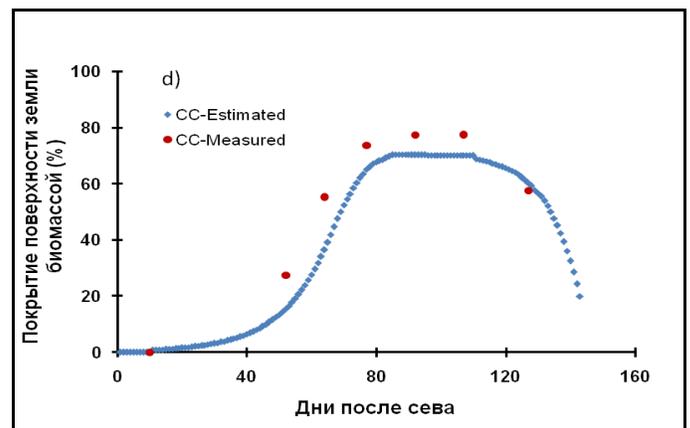
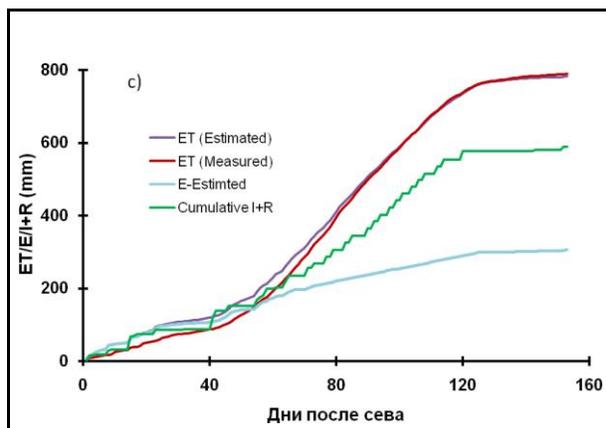
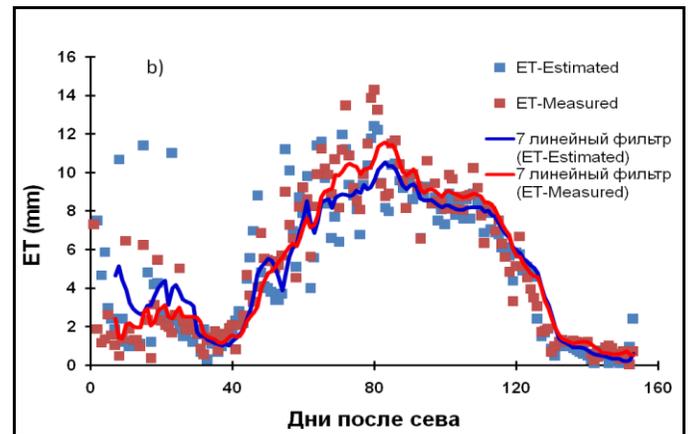
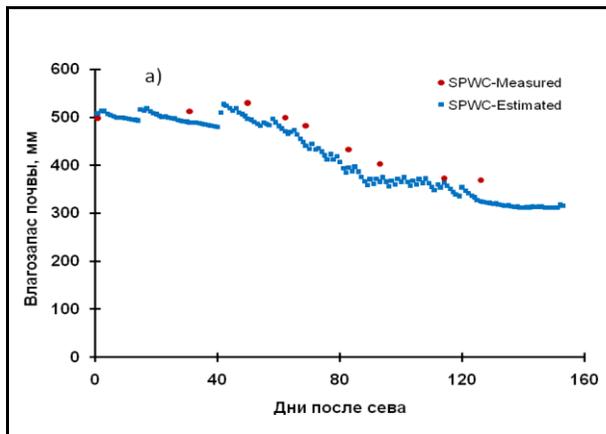


Рис. 25. Вид результатов симуляции

Для параметризации мы вводили в модель данные по хлопчатнику, которые приведены в таблице 1 и приложениях 1-8. Результаты симуляции показали, что симулированные (прогнозные) запасы воды в 0-150 см слое почвы в период вегетации культуры были несколько ниже, чем фактические измерения влагозапасов в полуметровом слое почвы с помощью нейтронного влагомера. При этом наибольшая разница в пределах 37,9-44,1 мм определена в период цветения-плодообразования хлопчатника (Рис. 26а). Причиной этого является несколько завышенный прогноз испарения воды из почвы в период от посева до цветения растений (Рис. 26с). В целом, симуляция (прогноз) моделью суточной эвапотранспирации (ЕТ) была ближе к фактической, измеренной с помощью взвешиваемых лизиметров. Однако прогноз ЕТ в первые 30 дней роста и развития хлопчатника был относительно завышенным.

Результаты симуляции роста, развития и урожайности показали, что прогнозные данные по этим параметрам были близкими к фактическим таковым (Рис. 26def). Например, разница между прогнозным и фактическим урожаями хлопка-сырца составила 3,4%, т.е. была в пределах допустимой 10% ошибки.



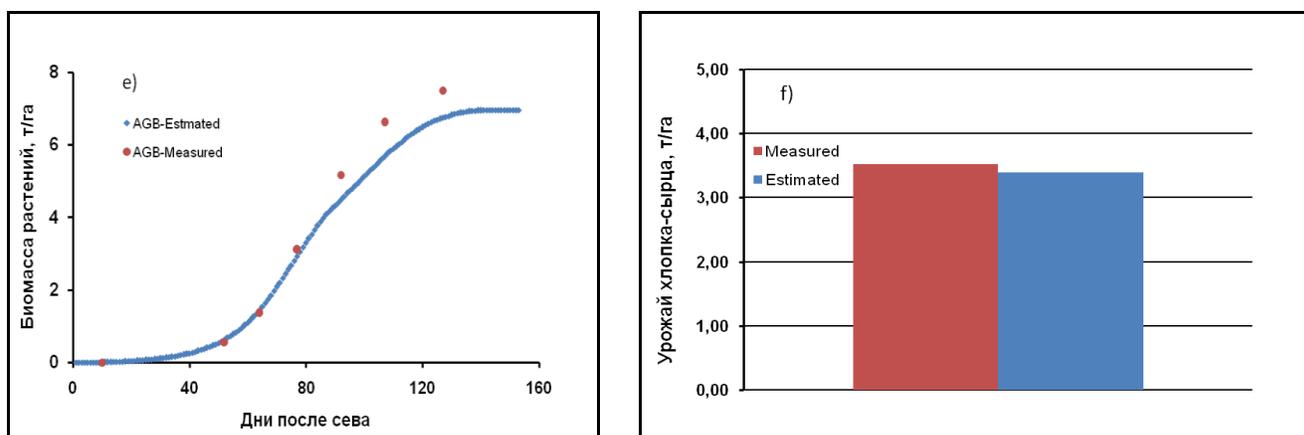


Рис. 26. Фактические и прогнозные (симулированные) показатели влагозапаса почвы (а), эвапотранспирации (b, с) и продуктивности хлопчатника (d, e, f) при орошении хлопчатника в оптимальной (100% ET) норме. ET- эвапотранспирация; E-испарение; I-полив; R-осадки; AGB – надземная биомасса растений; Measured-фактический; Estimated-прогнозный.

Для статистической оценки эффективности агрономических, гидрологических и других моделей, прогнозные ( $P_i$ ; ва  $i = 1, 2, \dots, n$ ) и фактические данные ( $Q_i$ ; ва  $i = 1, 2, \dots, n$ ), определенные в лизиметрических и полевых опытах, сопоставляются между собой. Как правило, единицы измерений фактических и прогнозных данных должны быть одинаковой.

Для оценки эффективности модели мы использовали различные коэффициенты и индексы. В результате, симулированные моделью (прогнозные) и фактические данные были обработаны разными статистическими методами (Табл. 2).

Таблица 2

Параметры оценки	Показатели	
	Эвапотранспирация	Запас воды в почве
d (Willmott et al. 2012)	0,937	0,935
E (Legates and McCabe 1999)	0,677	0,461
MAE, мм	1,10	29,2
RMSE, мм	1,81	31,7
Коэффициент детерминации, $R^2$	0,780	0,937
	Биомасса растений	Урожай хлопка-сырца
MAE, т/га	0,74	0,26
RMSE, т/га	1,11	0,31
Фактический, т/га	7,50	3,52
Симуляция (прогноз), т/га	6,97	3,40
Доверительный интервал (Confidence T), т/га	2,51	0,40

*Коэффициент детерминации* – Квадрат коэффициента корреляции Пирсона ( $R^2 = r^2$ ). Коэффициент корреляции измеряет линейную ковариацию между двумя группами данных. Эти коэффициенты без единиц измерений, но имеют границы (от -1 до +1 для  $r$ , от 0 до 1 для  $R^2$ ). Возможность взаимного сопоставления данных с разными размерами и единицами измерений является выигрышной стороной коэффициента детерминации и корреляции Пирсона. Как правило, в сравнении с корреляцией, коэффициент детерминации даёт более полный результат, так как характеризует ту часть общей дисперсии результатов, которую можно объяснить моделью регрессии.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[ \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \cdot \left[ \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right)^2 \quad [12]$$

Здесь и в последующих уравнениях:  $O_i$  – фактически измеренное;  $\bar{O}$  – измеренное (среднее);  $P_i$  – прогнозный и  $\bar{P}$  – прогнозный (средний).

Коэффициенты детерминации и корреляции Пирсона не измеряют разницу между двумя группами данных. Поэтому не рекомендуется применять эти коэффициенты для определения взаимного согласования разных групп данных.

Следующие индексы также заслуживают внимания для использования – *Абсолютная ошибка среднего показателя* (MAE – Mean Absolute Error) и *среднеквадратичная ошибка* (RMSE – Root Mean Squared Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad [13]$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad [14]$$

Индексы MAE и RMSE измеряют фактическую разницу между двумя группами данных. Эти индексы, в отличие от коэффициентов детерминации и корреляции Пирсона, не имеют границ, зависят от размеров данных и их единиц измерений. Например, если в группах X и Y значения изменяются от 0 до 255 или от 0 до 65535, то MAE и RMSE между X и Y может быть разным.

Для преодоления подобных недостатков при оценке эффективности модели С.Ж.Уилмотт и другие (2012) разработали *индекс согласования* ( $d$ ):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}|) + (|P_i - \bar{P}|)^2} \quad [15]$$

Индекс согласования Уилмотт ( $d$ ) без единиц измерения, имеет границы (от 0 до 1). По мере сближения фактических и прогнозных данных этот индекс приближается к единице ( $d \rightarrow 1$ ).

*Коэффициент эффективности* ( $E$ ) широко используется для оценки эффективности различных гидрологических моделей:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [16]$$

Границы коэффициента эффективности от  $-\infty$  до 1,0. Коэффициент эффективности возрастает по мере оптимизации взаимного согласования фактических и прогнозных данных.

## Использованная литература:

1. Allen, R., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper № 56. Rome, Italy. 300 p.
2. Boote, K.J., J.W. Jones, and N.B. Pickering. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *ASA Agron. J.* 88:704-716.
3. Doorenbos, J., A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. ISBN 92-5-100744-6. Rome, FAO. 201 p.
4. Farahani, H.J., G. Izzi, T.Y. Oweis. 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *ASA Agron. J.* 101:469-476.
5. Garcia-Vila, M., E. Fereres, L. Mateos, F. Orgaz and P. Steduto. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *ASA Agron. J.* 101:477-487.
6. Jones, J.W., G.Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman, and J.T. Ritchie. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18:235-265.
7. Jones, J.W., and J.R. Kiniry (ed.). 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. Texas A&M Univ. Press, College Station.
8. Keating, B.A., P.S. Carberry, G.L. Hammer. M.E. Probert, M.J. Robertson, D. Holzworth, N.I. Huth, J.N.G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. Mclean, K. Verburg, V. Snow, J.P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K.L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R.L. McCown, D.M. Freebairn, and C.J. Smith. 2003. An overview of APSIM: a model designed for farming system simulation. *Eur. J. Agron.* 18:267-288.
9. Kiniry, J.R., J.R. Williams, P.W. Gassman, and P. Debaeke. 1992. A general, process oriented model for two competing plant species. *Trans. ASAE* 35:801-810.
10. Legates, D.R., and G.J. McCabe Jr. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resour. Res.* 35:233-241.
11. Loomis, R.S., R. Rabbinge, and E. Ng. 1979. Explanatory model in crop physiology. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 30:339-367.
12. Monteith, J.L. 1996. The quest for balance in crop modelling. *ASA Agron. J.* 88:695-697.
13. Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres. 2012. AquaCrop. Version 4.0. Reference manual. Chapter 2. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. 170 p.
14. Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres. 2011. FAO cropwater productivity model to simulate yield response to water. Chapter 1. Version 3.1plus. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. 21 p.
15. Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres. 2010. AquaCrop reference manual. Annexes. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. 50 p.
16. Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: i. Concepts and underlying principles. *ASA Agron. J.* 101:426-437.
17. Stockle, C.O., M. Donatelli, and R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping system simulation model. *Eur. J. Agron.* 18:289-307.
18. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. 2005. Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers. Final Report. 70 p.  
<http://www.kimberly.uidaho.edu/water/asceewri/ascestzdetmain2005.pdf> (01 Oct 2014).
19. Van Ittersum, M.K., P.A. Leffelaar, H. van Keulen, M.J. Kropff, L. Bastiaans, and J. Goudriaan. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Eur. J. Agron.* 18:201-234.
20. Whisler, F.D., B.Acock, D.N. Baker, R.E. Fye, H.F.Hodges, J.R. Lambert. H.E. Lemmon, J.M. McKinion, and V.R. Reddy. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40:141-208.
21. Williams, J.R., C.A. Jones, and P.T. Dyke. 1989. EPIC –Erosion/productivity impact calculator. 1. The EPIC model. USDA-ARS, Temple, TX.
22. Willmott, C.J., S.M. Robeson, and K. Matsuura. 2012. Short communication. A refined index of model performance. *Int. J. Climatol.* 32:2088-2094.



Daily air temperature data for CPRL, Bushland, Texas, 2000  
 1 : Daily records (1=daily, 2=10-daily and 3=monthly data)  
 1 : First day of record (1, 11 or 21 for 10-day or 1 for months)  
 5 : First month of record  
 2000 : First year of record (1901 if not linked to a specific year)

Tmin (°C) TMax (°C)

=====

6.6	16.0
6.3	17.8
6.1	24.4
9.9	27.8
15.8	31.0
13.0	34.8
14.6	34.1
14.5	26.4
9.1	23.2
10.5	34.9
14.2	34.6
11.3	21.4
5.2	20.1
8.5	27.0
13.4	35.7
19.3	34.6
17.3	26.3
10.5	19.2
6.1	21.0
7.8	27.4
11.6	30.1
15.2	34.7
15.3	38.0
17.5	34.9
14.7	24.4
13.2	31.8
15.3	26.9
12.9	31.3
15.7	35.2
18.3	35.5
19.5	32.6
17.0	28.2
16.0	17.6
16.6	24.4
17.4	27.7
15.2	25.2
15.9	28.3

Bushland, Texas - Data from research grass weather station at USDA-ARS-CPRL

- 1 : Daily records (1=daily, 2=10-daily and 3=monthly data)
- 1 : First day of record (1, 11 or 21 for 10-day or 1 for months)
- 5 : First month of record
- 2000 : First year of record (1901 if not linked to a specific year)

Average ETo (mm/day)

=====

- 4.5
- 3.6
- 5.2
- 5.0
- 7.1
- 10.9
- 11.6
- 7.4
- 6.5
- 10.7
- 13.5
- 5.9
- 7.3
- 8.8
- 9.0
- 9.9
- 11.9
- 7.0
- 4.5
- 7.4
- 7.7
- 9.6
- 11.1
- 10.1
- 2.7
- 8.7
- 8.2
- 8.9
- 12.3
- 11.9
- 10.6
- 4.7
- 1.2
- 4.0
- 6.3
- 6.2
- 7.2

Данные по хлопчатнику (в качестве примера) для введения в файл  
сельскохозяйственной культуры

Сокращение	Характеристика показателя	Показатель для введения в модель
$T_{base}$	Минимальная температура воздуха ( $^{\circ}C$ )	12,0
$T_{upper}$	Максимальная температура воздуха ( $^{\circ}C$ )	35,0
	Покрытие поверхности почвы единичными проростками при появлении 90% всходов ( $cm^2/растение$ )	5,00
	Густота стояния растений (растений/га)	158000
	Необходимая эффективная температура воздуха в период «посев - всходы» (дни)	10
CGC	Коэффициент формирования биомассы (%/сутки)	7,5
	Максимальное покрытие поверхности земли биомассой (%)	Почти покрыт (0,95)
	Время необходимое для периода «посев – старение растения» (дни)	110
CDC	Коэффициент уменьшения биомассы (%/сутки)	6,5
	Длина вегетационного периода (дни)	153
	Время для периода «посев – цветение» (дни)	65
	Длительность периода цветения (дни)	50
	Завершение формирования новых коробочек на растениях в связи с цветением	-
	Целостность формируемых коробочек	Высокая
$Z_n$	Минимальная глубина распространения корней	0,30 м
$Z_x$	Максимальная глубина распространения корней	1,50 м
	Фактор, характеризующий зону распространения корней	15
	Время, необходимое после сева для развития корней на максимальную глубину	Функция скорости развития корней: 1,7 см/день
$K_{cb_x}$	Коэффициент культуры при максимальной биомассе (до старения растений)	1,20
	Снижение коэффициента культуры в связи с дефицитом азота или вегетацией растения	0,30
	Влияние биомассы растений на испарение из почвы к концу вегетационного периода	60
WP*	Оптимизированная продуктивность воды для $ET_0$ и $CO_2$ ( $г/м^2$ )	15,0
	Оптимизированная продуктивность воды для $ET_0$ и $CO_2$ в период формирования урожая	70
HI <sub>0</sub>	Относительный индекс урожая (%)	41

	Формирование индекса урожая (период в GDD)	До тех пор, пока на кусте не останется 5% зелёной биомассы
	Увеличение индекса урожая в связи с возможным дефицитом воды до цветения растений	Низкий
	Коэффициент, характеризующий отрицательное влияние закрытия устьиц листьев на индекс урожая в период накопления урожая	Средний
	Коэффициент, характеризующий положительное влияние ограничения чрезмерного вегетативный роста на индекс урожая в период накопления урожая	Низкий
	Возможное увеличение индекса урожая (%)	30
$P_{exp, lower}$	Граница снижения влажности почвы для накопления биомассы растениями (верхняя граница)	0,20
$P_{exp, upper}$	Граница снижения влажности почвы для накопления биомассы растениями (нижняя граница)	0,70
	Фактор, формирующий коэффициент водного стресса для накопления биомассы	3,0
$P_{sto}$	Верхняя граница уменьшения влажности почвы для контроля открытия/закрытия устьиц листьев	0,65
	Фактор, формирующий коэффициент водного стресса для контроля открытия/закрытия устьиц листьев	2,5
$P_{sen}$	Граница снижения влажности почвы (верхняя граница) после времени максимального накопления биомассы (в период старения листьев растения)	0,75
	Фактор, формирующий коэффициент водного стресса после времени максимального накопления биомассы (в период старения листьев растения)	2,5
	ЕТо в период стресса, до старения растений	0
$P_{pol}$	Граница снижения влажности почвы (верхняя граница) для прекращения опыления растений	0,85 (Приблизительно)
	Объём% в анаэробической точке (относительно насыщенного)	Среднеустойчив против застояния воды в поле
	Минимальная $^{\circ}C$ , ограничивающая опыление	12,0
	Максимальная $^{\circ}C$ , ограничивающая опыление	45
	Минимальная температура необходимая для формирования полной биомассы ( $^{\circ}C/день$ )	Не предусмотрена

Irrigation data for fully irrigated cotton in 2000, USDA-ARS-CPRL, Bushland, TX

4.0 : AquaCrop Version (June 2012)

1 : Sprinkler irrigation

100 : Percentage of soil surface wetted by irrigation

1 : Specified irrigation schedule

Day	Depth (mm)	ECw (dS/m)
2	14.9	0.1
15	15.6	0.1
55	17.1	0.1
58	17.5	0.1
64	15.2	0.1
65	16.2	0.1
71	22.2	0.1
73	12.1	0.1
77	19.0	0.1
79	18.6	0.1
83	18.8	0.1
85	19.4	0.1
90	20.8	0.1
92	19.3	0.1
94	17.5	0.1
97	19.6	0.1
99	19.7	0.1
101	18.4	0.1
104	19.0	0.1
106	18.3	0.1
108	17.8	0.1
112	19.5	0.1
114	18.5	0.1
120	23.5	0.1

Где,

Day	1, 2 и т. д. дни после посева
Depth (mm)	Норма полива и единица измерения
ECw (dS/m)	Электропроводность поливной воды (определяет уровень минерализации воды) и единица измерения

Приложение 6

Soil fertility, organic mulches and practices affecting runoff  
 4.0 : AquaCrop Version (June 2012)  
 5 : percentage (%) of ground surface covered by mulches  
 50 : effect (%) of mulches on reduction of soil evaporation  
 0 : Degree of soil fertility stress (%) - Effect is crop specific  
 0.10 : height (m) of soil bunds  
 1 : surface runoff prevented by field surface practices

Приложение 7

Bushland Pullman ClayLoam April 2000  
 60 : CN (Curve Number)  
 11 : Readily evaporable water from top layer (mm)  
 4 : number of soil layers  
 Thickness Sat FC WP Ksat description  
 ---(m)- ----(vol %)- ---- (mm/day) -----  
 0.18 50.0 33.0 18.0 66.0 Pullman Silty Clay Loam 0-18cm  
 0.56 44.0 33.0 22.0 50.0 Pullman Clay Loam 19-73  
 0.61 43.0 35.0 20.0 6.6 Pullman Clay Loam 74-135  
 0.95 46.0 32.0 16.0 200.0 Pullman Clay&SiCl 136-229

Приложение 8

Initial conditions for specific soil layers of fully irrigated cotton on DOY 168, 2000  
 4.0 : AquaCrop Version (June 2012)  
 0.0 : water layer (mm) stored between soil bunds (if present)  
 0.00 : electrical conductivity (dS/m) of water layer stored between soil bunds (if present)  
 1 : soil water content specified at particular depths  
 8 : number of soil depths considered

Soil depth (m)	Water content (vol%)	EC <sub>e</sub> (dS/m)
0.10	26.60	0.05
0.30	35.70	0.05
0.50	35.40	0.05
0.70	36.00	0.00
0.90	34.30	0.00
1.10	34.00	0.00
1.30	30.80	0.00
1.50	32.20	0.00

## Результаты симуляции: Влагозапас почвы, мм

Day	Month	Year	DAP	Stage	SPWC-	Wr(Zx)	Z	Wr	Wr(SAT)	Wr(FC)	Wr(exp)	Wr(sto)	Wr(sen)	Wr(PWP)
					Estimated									
					mm	mm	m	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
17	5	2000	1	1	506.6	490.7	0.3	81.5	144	99	90	77.5	65.2	54
18	5	2000	2	1	514.1	498.2	0.3	88.9	144	99	90	72	65.2	54
19	5	2000	3	1	511.8	495.9	0.3	86.5	144	99	90	69.6	65.2	54
20	5	2000	4	1	507.1	491.2	0.3	81.8	144	99	90	72.4	65.2	54
21	5	2000	5	1	504.1	488.2	0.3	78.7	144	99	90	72.7	65.2	54
22	5	2000	6	1	501.7	485.8	0.3	76.3	144	99	90	74.9	65.2	54
23	5	2000	7	1	499.8	483.9	0.32	82.4	154.6	107	97.2	82.6	70.5	58.3
24	5	2000	8	1	499.7	483.8	0.36	94.1	170.2	118.7	107.9	90.4	78.2	64.7
25	5	2000	9	1	499.5	483.5	0.39	104.4	184.1	129.1	117.4	87.7	85.1	70.4
26	5	2000	10	1	497.9	481.8	0.42	112.8	196.9	138.7	126.1	103.4	91.4	75.6
27	5	2000	11	2	496.4	480.4	0.45	120.7	208.9	147.6	142	109.3	101.7	80.5
28	5	2000	12	2	495.1	479.1	0.47	128.2	220.2	156.1	152	116.8	108.6	85.2
29	5	2000	13	2	493.6	477.6	0.5	135.1	230.9	164.2	164.2	129.1	119.3	89.6
30	5	2000	14	2	492.3	476.3	0.52	141.7	241.3	172	172	134.5	124.4	93.8
31	5	2000	15	2	516.4	500.4	0.54	173.5	251.2	179.4	179.4	137.7	127.6	97.9
1	6	2000	16	2	514	498	0.57	178.4	260.9	186.7	168.8	130.9	122.5	101.8
2	6	2000	17	2	516.8	500.8	0.59	188.4	270.2	193.7	163.7	128.1	120.7	105.6
3	6	2000	18	2	512.6	496.5	0.61	191	279.3	200.5	178.8	138.9	130.2	109.4
4	6	2000	19	2	508.1	492.1	0.63	193.4	288.2	207.1	192.6	148.8	138.9	113
5	6	2000	20	2	505.3	489.3	0.65	197.1	296.8	213.6	198.3	153.3	143.1	116.5
6	6	2000	21	2	502.9	486.9	0.67	201.1	305.3	220	208	160.4	149.5	120
7	6	2000	22	2	500.5	484.5	0.69	204.9	313.6	226.2	223.1	171.2	158.9	123.4
8	6	2000	23	2	501.8	485.8	0.7	212.3	321.7	232.3	231.2	177.2	164.3	126.7
9	6	2000	24	2	499.6	483.6	0.72	216.1	329.7	238.2	219.7	170	158.8	129.9
10	6	2000	25	2	497.6	481.6	0.74	220.1	337.5	244.1	228.7	176.5	164.7	133.2

*продолжение приложения 9*

11	6	2000	26	2	496.1	480.1	0.76	224.6	345	250	232.3	179.6	167.7	136.5
12	6	2000	27	2	494.4	478.4	0.77	228.9	352.3	256.1	247.4	190.4	177.1	139.9
13	6	2000	28	2	492.6	476.6	0.79	233	359.4	262	262	203	188	143.3
14	6	2000	29	2	491.3	475.3	0.81	237.7	366.4	267.9	258.2	198.9	185.1	146.6
15	6	2000	30	2	489.7	473.7	0.82	241.8	373.4	273.7	273.7	213.5	197.7	149.9
16	6	2000	31	2	489.1	473.1	0.84	246.9	380.2	279.4	254.1	197.3	184.7	153.2
17	6	2000	32	2	488.8	472.8	0.86	252.3	387	285	247.5	193.5	182	156.4
18	6	2000	33	2	488.5	472.5	0.87	257.5	393.6	290.5	251.8	196.9	185.3	159.6
19	6	2000	34	2	487.4	471.4	0.89	261.9	400.2	296	281.3	217.4	202.7	162.7
20	6	2000	35	2	486	470	0.9	265.9	406.7	301.5	299.9	230.6	214.1	165.8
21	6	2000	36	2	485.3	469.3	0.92	270.6	413.2	306.8	278.4	216.6	202.9	168.9
22	6	2000	37	2	484.2	468.2	0.93	274.9	419.6	312.1	294.5	228	212.8	171.9
23	6	2000	38	2	482.9	466.9	0.95	278.8	425.9	317.4	310.3	239.2	222.5	174.9
24	6	2000	39	2	481.4	465.4	0.96	282.5	432.1	322.6	316.5	244	226.9	177.9
25	6	2000	40	2	480.1	464.1	0.98	286.4	438.3	327.8	317.2	245	228.1	180.9
26	6	2000	41	2	510.2	494.2	0.99	321.5	444.4	332.9	287.1	225.2	212.1	183.8
27	6	2000	42	2	526	510	1.01	342.4	450.5	337.9	294	230.4	216.8	186.7
28	6	2000	43	2	523.8	507.8	1.02	345.2	456.5	342.9	295.6	232	218.6	189.5
29	6	2000	44	2	519.3	503.3	1.04	345.7	462.5	347.9	311.6	243.3	228.4	192.4
30	6	2000	45	2	513.8	497.8	1.05	345.1	468.4	352.8	322.9	251.4	235.5	195.2
1	7	2000	46	2	518.8	502.8	1.06	355	474.2	357.7	334.1	259.5	242.6	198
2	7	2000	47	2	510	494	1.08	351.1	480.1	362.6	349.5	270.4	252	200.7
3	7	2000	48	2	505.3	489.3	1.09	351.1	485.8	367.4	347.9	269.9	251.9	203.5
4	7	2000	49	2	501.2	485.2	1.11	351.8	491.6	372.1	360.8	279.1	259.9	206.2
5	7	2000	50	2	497.2	481.2	1.12	352.6	497.2	376.9	371.6	286.8	266.8	208.9
6	7	2000	51	2	493.4	477.4	1.13	353.5	502.9	381.6	379.1	292.4	271.7	211.6
7	7	2000	52	2	490	474	1.15	354.7	508.5	386.2	378.4	292.4	272.2	214.3
8	7	2000	53	2	486.6	470.6	1.16	355.9	514	390.9	384.1	296.8	276.1	216.9
9	7	2000	54	2	482.8	466.8	1.17	356.8	519.6	395.5	392.9	303.2	281.8	219.5

*продолжение приложения 9*

10	7	2000	55	2	488.6	472.6	1.19	367.1	525	400	397.7	306.9	285.3	222.2
11	7	2000	56	2	486.4	470.4	1.2	369.4	530.5	404.6	395.6	306	284.8	224.8
12	7	2000	57	2	484.1	468.1	1.21	371.6	535.9	409.1	381.2	296.6	277.5	227.3
13	7	2000	58	2	497	481	1.22	389	541.3	413.6	373.9	292.2	274.2	229.9
14	7	2000	59	2	488.2	472.2	1.24	384.7	546.6	418	399.9	310.2	289.5	232.4
15	7	2000	60	2	480.3	464.3	1.25	381.3	551.9	422.4	415.5	321.2	299	235
16	7	2000	61	2	475.1	459.1	1.26	380.4	557.2	426.8	422.3	326.3	303.5	237.5
17	7	2000	62	2	471.1	455.1	1.27	380.8	562.4	431.2	402.8	313.6	293.3	240
18	7	2000	63	2	465.5	449.5	1.29	379.5	567.7	435.6	423.5	328	305.6	242.5
19	7	2000	64	2	469.1	453.1	1.3	387.4	572.8	439.9	436.7	337.4	313.7	244.9
20	7	2000	65	2	473.5	457.5	1.31	396.2	578	444.2	441.7	341.2	317.3	247.4
21	7	2000	66	3	463.8	447.8	1.32	390.7	583.1	448.4	434.1	336.5	313.7	249.8
22	7	2000	67	3	455.3	439.3	1.34	386.5	588.2	452.7	438.5	339.9	316.9	252.3
23	7	2000	68	3	448.7	432.7	1.35	384.2	593.3	456.9	440.2	341.5	318.5	254.7
24	7	2000	69	3	441	425	1.36	380.4	598.8	460.8	452.5	350.1	325.9	256.7
25	7	2000	70	3	434.6	418.6	1.37	377.8	604.3	464.6	443.2	344	321.1	258.6
26	7	2000	71	3	444.6	428.6	1.38	391.5	609.7	468.4	467.5	360.8	335.2	260.5
27	7	2000	72	3	433.4	417.4	1.4	384.1	615.2	472.2	465.9	359.9	334.8	262.4
28	7	2000	73	3	435.9	419.9	1.41	390.4	620.6	476	457.7	354.6	330.7	264.2
29	7	2000	74	3	427.2	411.2	1.42	385.4	626	479.7	456.7	354.2	330.6	266.1
30	7	2000	75	3	419.1	403.1	1.43	381.1	631.3	483.5	455.3	353.5	330.2	268
31	7	2000	76	3	412.3	396.3	1.44	378	636.7	487.2	450.2	350.3	327.8	269.8
1	8	2000	77	3	421.9	405.9	1.45	391.3	642	490.9	471	364.6	339.9	271.7
2	8	2000	78	3	411.6	395.6	1.47	384.6	647.3	494.6	481.3	371.8	346.1	273.5
3	8	2000	79	3	418.7	402.7	1.48	395.5	652.5	498.2	495	381.4	354.3	275.4
4	8	2000	80	3	406.4	390.4	1.49	386.8	657.8	501.9	501.9	386.5	358.8	277.2
5	8	2000	81	3	394.1	378.1	1.5	378.1	663	505.5	505.5	389	361.1	279
6	8	2000	82	3	384.6	368.6	1.5	368.6	663	505.5	486	375.7	350.1	279
7	8	2000	83	3	395.4	379.4	1.5	379.4	663	505.5	476.8	369.5	344.9	279

*продолжение приложения 9*

8	8	2000	84	3	387.3	371.3	1.5	371.3	663	505.5	475.4	368.5	344.1	279
9	8	2000	85	3	395.9	379.9	1.5	379.9	663	505.5	492.2	379.9	353.6	279
10	8	2000	86	3	385.3	369.3	1.5	369.3	663	505.5	495.5	382.1	355.4	279
11	8	2000	87	3	375.7	359.7	1.5	359.7	663	505.5	495.6	382.2	355.5	279
12	8	2000	88	3	366.5	350.5	1.5	350.5	663	505.5	501.6	386.3	358.8	279
13	8	2000	89	3	358.3	342.3	1.5	342.3	663	505.5	499.9	385.2	357.9	279
14	8	2000	90	3	369.8	353.8	1.5	353.8	663	505.5	502	386.6	376.6	279
15	8	2000	91	3	361.2	345.2	1.5	345.2	663	505.5	501.3	386.1	376.3	279
16	8	2000	92	3	371.3	355.3	1.5	355.3	663	505.5	491.5	379.4	371.4	279
17	8	2000	93	3	364.7	348.7	1.5	348.7	663	505.5	471.5	365.9	361.6	279
18	8	2000	94	3	373.8	357.8	1.5	357.8	663	505.5	488.6	377.5	370	279
19	8	2000	95	3	364.5	348.5	1.5	348.5	663	505.5	505.5	389.8	379	279
20	8	2000	96	3	356.1	340.1	1.5	340.1	663	505.5	505.5	389.5	378.7	279
21	8	2000	97	3	367.4	351.4	1.5	351.4	663	505.5	494.6	381.5	372.9	279
22	8	2000	98	3	359.9	343.9	1.5	343.9	663	505.5	487.9	377	369.6	279
23	8	2000	99	3	371.8	355.8	1.5	355.8	663	505.5	481.3	372.6	366.4	279
24	8	2000	100	3	364.5	348.5	1.5	348.5	663	505.5	479.7	371.5	365.6	279
25	8	2000	101	3	373.6	357.6	1.5	357.6	663	505.5	489.5	378.1	370.5	279
26	8	2000	102	3	365.1	349.1	1.5	349.1	663	505.5	495	381.8	373.2	279
27	8	2000	103	3	357.2	341.2	1.5	341.2	663	505.5	496.1	382.6	373.7	279
28	8	2000	104	3	367.8	351.8	1.5	351.8	663	505.5	491	379.1	371.2	279
29	8	2000	105	3	360.2	344.2	1.5	344.2	663	505.5	487.9	377	369.7	279
30	8	2000	106	3	369.6	353.6	1.5	353.6	663	505.5	490	378.4	370.7	279
31	8	2000	107	3	362	346	1.5	346	663	505.5	486.9	376.3	369.2	279
1	9	2000	108	3	371.1	355.1	1.5	355.1	663	505.5	493.1	380.5	372.2	279
2	9	2000	109	3	362.6	346.6	1.5	346.6	663	505.5	497.8	383.7	374.5	279
3	9	2000	110	3	354.7	338.7	1.5	338.7	663	505.5	500.2	385.3	375.7	279
4	9	2000	111	3	347.8	331.8	1.5	331.8	663	505.5	497	383.1	374.1	279
5	9	2000	112	3	359.9	343.9	1.5	343.9	663	505.5	495.8	382.4	373.6	279

*продолжение приложения 9*

6	9	2000	113	3	352.8	336.8	1.5	336.8	663	505.5	493.4	380.7	372.4	279
7	9	2000	114	3	363.9	347.9	1.5	347.9	663	505.5	478.4	370.6	365	279
8	9	2000	115	3	357.1	341.1	1.5	341.1	663	505.5	484.6	374.8	368	279
9	9	2000	116	4	350.9	334.9	1.5	334.9	663	505.5	482.8	373.6	367.2	279
10	9	2000	117	4	344.8	328.8	1.5	328.8	663	505.5	491.6	379.5	371.5	279
11	9	2000	118	4	339	323	1.5	323	663	505.5	493.8	381	372.6	279
12	9	2000	119	4	334.6	318.7	1.5	318.7	663	505.5	476.8	369.5	364.2	279
13	9	2000	120	4	352.7	336.8	1.5	336.8	663	505.5	480.2	371.8	365.9	279
14	9	2000	121	4	346.9	331	1.5	331	663	505.5	485.3	375.2	368.4	279
15	9	2000	122	4	342	326.1	1.5	326.1	663	505.5	477	369.6	364.3	279
16	9	2000	123	4	336.9	321	1.5	321	663	505.5	487.4	376.6	369.4	279
17	9	2000	124	4	332.1	316.3	1.5	316.3	663	505.5	490.4	378.7	370.9	279
18	9	2000	125	4	327.5	312	1.5	312	663	505.5	494.4	381.4	372.9	279
19	9	2000	126	4	325.1	309.7	1.5	309.7	663	505.5	496.4	382.7	373.8	279
20	9	2000	127	4	323.5	308.2	1.5	308.2	663	505.5	460.9	358.7	356.3	279
21	9	2000	128	4	321.8	306.5	1.5	306.5	663	505.5	476.3	369.1	363.9	279
22	9	2000	129	4	320.1	304.8	1.5	304.8	663	505.5	486	375.7	368.7	279
23	9	2000	130	4	319.6	304.3	1.5	304.3	663	505.5	433.4	340.1	342.8	279
24	9	2000	131	4	319.1	303.8	1.5	303.8	663	505.5	433.4	340.1	342.8	279
25	9	2000	132	4	318.1	302.8	1.5	302.8	663	505.5	457	356.1	354.4	279
26	9	2000	133	4	316.9	301.6	1.5	301.6	663	505.5	475.3	368.5	363.4	279
27	9	2000	134	4	315.9	300.6	1.5	300.6	663	505.5	471.7	366.1	361.7	279
28	9	2000	135	4	315	299.7	1.5	299.7	663	505.5	478.2	370.5	364.9	279
29	9	2000	136	4	314.1	298.7	1.5	298.7	663	505.5	487.4	376.6	369.4	279
30	9	2000	137	4	313.3	298	1.5	298	663	505.5	482.6	373.4	367	279
1	10	2000	138	4	312.6	297.3	1.5	297.3	663	505.5	481.7	372.8	366.6	279
2	10	2000	139	4	312	296.7	1.5	296.7	663	505.5	484.9	375	368.2	279
3	10	2000	140	4	311.5	296.2	1.5	296.2	663	505.5	488.5	377.4	370	279
4	10	2000	141	4	311.2	295.9	1.5	295.9	663	505.5	456.1	355.5	354	279

*продолжение приложения 9*

5	10	2000	142	4	311.1	295.8	1.5	295.8	663	505.5	437.3	342.8	344.7	279
6	10	2000	143	4	312.5	297.2	1.5	297.2	663	505.5	432.6	339.6	342.4	279
7	10	2000	144	4	313	297.7	1.5	297.7	663	505.5	427.9	336.4	340.1	279
8	10	2000	145	4	312.5	297.2	1.5	297.2	663	505.5	429.3	337.4	340.8	279
9	10	2000	146	4	312.4	297.1	1.5	297.1	663	505.5	436.7	342.4	344.4	279
10	10	2000	147	4	312.2	296.9	1.5	296.9	663	505.5	450.1	351.4	351	279
11	10	2000	148	-9	312	296.7	1.5	296.7	663	505.5	450.1	356.1	351	279
12	10	2000	149	-9	311.9	296.6	1.5	296.6	663	505.5	450.1	348.1	351	279
13	10	2000	150	-9	311.7	296.4	1.5	296.4	663	505.5	450.1	360.1	351	279
14	10	2000	151	-9	311.6	296.2	1.5	296.2	663	505.5	450.1	356.8	351	279
15	10	2000	152	-9	318.4	303	1.5	303	663	505.5	450.1	339.3	351	279
16	10	2000	153	-9	316	300.7	1.5	300.7	663	505.5	450.1	351.6	351	279

DAP : Days after planting

Stage : 0: before/after planting

Stage : 1: emergence or transplant recovery

Stage : 2: vegetative stage

Stage : 3: flowering

Stage : 4: yield formation and ripening

SPWC : Soil Profile Water content (layer: 0.00 - 1.55 m)

Wr(Zx) : Water content in maximum effective root zone (Zx = 1.50 m)

Z : Effective rooting depth

Wr : Water content in effective root zone

Wr(Sat) : Water content in effective root zone if saturated

Wr(FC) : Water content in effective root zone at field capacity

Wr(exp) : Water content in effective root zone at upper threshold for leaf expansion

Wr(sto) : Water content in effective root zone at upper threshold for stomatal closure

Wr(sen) : Water content in effective root zone at upper threshold for early canopy senescence

Wr(PWP) : Water content in effective root zone at permanent wilting point

Результаты симуляции: Развитие и продуктивность хлопчатника\*

Year	DAP	Stage	GD	Z	StExp	StSto	StSen	CC-					AGB-				
								Est	Kc(Tr)	Trx	Tr	Tr/Trx	WP	Est	HI	YieldPart	WPet
			°C-day	m	%	%	%	%	-	mm	mm	%	g/m <sup>2</sup>	t/ha	%	ton/ha	kg/m <sup>3</sup>
2000	1	1	9.8	0.3	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	2	1	2.8	0.3	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	3	1	1.6	0.3	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	4	1	5.6	0.3	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	5	1	8.9	0.3	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	6	1	13	0.3	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	7	1	13.1	0.32	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	8	1	14.2	0.36	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	9	1	7.5	0.39	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	10	1	10.5	0.42	-9	-9	-9	0	0	0	0	100	15	0	-9.9	0	0
2000	11	2	9.1	0.45	-9	0	0	0.9	0.02	0.1	0.1	100	15	0.003	-9.9	0	0
2000	12	2	10.1	0.47	25	0	0	0.9	0.02	0.2	0.2	100	15	0.005	-9.9	0	0
2000	13	2	13.4	0.5	37	0	0	0.9	0.02	0.2	0.2	100	15	0.008	-9.9	0	0
2000	14	2	14.6	0.52	36	0	0	1	0.02	0.2	0.2	100	15	0.011	-9.9	0	0
2000	15	2	14.1	0.54	0	0	0	1.1	0.02	0.2	0.2	100	15	0.015	-9.9	0	0
2000	16	2	10.6	0.57	0	0	0	1.2	0.02	0.1	0.1	100	15	0.018	-9.9	0	0
2000	17	2	4.8	0.59	0	0	0	1.2	0.03	0	0	100	15	0.022	-9.9	0	0
2000	18	2	8.5	0.61	0	0	0	1.3	0.03	0.1	0.1	100	15	0.026	-9.9	0	0
2000	19	2	10.5	0.63	0	0	0	1.4	0.03	0.2	0.2	100	15	0.031	-9.9	0	0
2000	20	2	8.2	0.65	0	0	0	1.6	0.03	0.2	0.2	100	15	0.035	-9.9	0	0
2000	21	2	10.1	0.67	2	0	0	1.7	0.03	0.2	0.2	100	15	0.04	-9.9	0	0
2000	22	2	11.4	0.69	7	0	0	1.8	0.04	0.4	0.4	100	15	0.046	-9.9	0	0
2000	23	2	10.6	0.7	3	0	0	1.9	0.04	0.4	0.4	100	15	0.052	-9.9	0	0
2000	24	2	11.3	0.72	0	0	0	2.1	0.04	0.2	0.2	100	15	0.058	-9.9	0	0
2000	25	2	11.2	0.74	2	0	0	2.2	0.05	0.3	0.3	100	15	0.065	-9.9	0	0

*продолжение приложения 10*

2000	26	2	10.9	0.76	2	0	0	2.4	0.05	0.3	0.3	100	15	0.072	-9.9	0	0
2000	27	2	10.5	0.77	6	0	0	2.6	0.05	0.4	0.4	100	15	0.08	-9.9	0	0
2000	28	2	15.1	0.79	13	0	0	2.8	0.06	0.6	0.6	100	15	0.089	-9.9	0	0
2000	29	2	9.4	0.81	7	0	0	3	0.06	0.5	0.5	100	15	0.098	-9.9	0	0
2000	30	2	12.7	0.82	15	0	0	3.2	0.06	0.7	0.7	100	15	0.107	-9.9	0	0
2000	31	2	8.1	0.84	2	0	0	3.4	0.07	0.3	0.3	100	15	0.118	-9.9	0	0
2000	32	2	3.7	0.86	0	0	0	3.7	0.07	0.2	0.2	100	15	0.129	-9.9	0	0
2000	33	2	5.4	0.87	0	0	0	3.9	0.08	0.2	0.2	100	15	0.141	-9.9	0	0
2000	34	2	11.6	0.89	6	0	0	4.2	0.09	0.6	0.6	100	15	0.153	-9.9	0	0
2000	35	2	13.9	0.9	13	0	0	4.5	0.09	0.9	0.9	100	15	0.167	-9.9	0	0
2000	36	2	10.2	0.92	2	0	0	4.9	0.1	0.5	0.5	100	15	0.182	-9.9	0	0
2000	37	2	13.4	0.93	6	0	0	5.2	0.1	0.7	0.7	100	15	0.197	-9.9	0	0
2000	38	2	12.8	0.95	11	0	0	5.6	0.11	1	1	100	15	0.214	-9.9	0	0
2000	39	2	14.3	0.96	12	0	0	6	0.12	1.1	1.1	100	15	0.232	-9.9	0	0
2000	40	2	15	0.98	10	0	0	6.4	0.13	1.1	1.1	100	15	0.251	-9.9	0	0
2000	41	2	9.1	0.99	0	0	0	6.9	0.14	0.3	0.3	100	15	0.271	-9.9	0	0
2000	42	2	8	1.01	0	0	0	7.4	0.15	0.4	0.4	100	15	0.293	-9.9	0	0
2000	43	2	7.1	1.02	0	0	0	8	0.16	0.3	0.3	100	15	0.317	-9.9	0	0
2000	44	2	9	1.04	0	0	0	8.6	0.17	0.7	0.7	100	15	0.342	-9.9	0	0
2000	45	2	11.9	1.05	0	0	0	9.3	0.18	1	1	100	15	0.369	-9.9	0	0
2000	46	2	10.8	1.06	0	0	0	10	0.19	1.3	1.3	100	15	0.399	-9.9	0	0
2000	47	2	14.3	1.08	0	0	0	10.8	0.21	1.7	1.7	100	15	0.43	-9.9	0	0
2000	48	2	13.9	1.09	0	0	0	11.6	0.22	1.6	1.6	100	15	0.464	-9.9	0	0
2000	49	2	15.3	1.11	1	0	0	12.5	0.24	2.1	2.1	100	15	0.5	-9.9	0	0
2000	50	2	14.3	1.12	3	0	0	13.4	0.26	2.5	2.5	100	15	0.538	-9.9	0	0
2000	51	2	12.5	1.13	5	0	0	14.4	0.27	2.8	2.8	100	15	0.579	-9.9	0	0
2000	52	2	12.2	1.15	5	0	0	15.5	0.29	2.7	2.7	100	15	0.623	-9.9	0	0
2000	53	2	13.1	1.16	6	0	0	16.6	0.31	2.9	2.9	100	15	0.67	-9.9	0	0
2000	54	2	14.8	1.17	9	0	0	17.8	0.33	3.3	3.3	100	15	0.72	-9.9	0	0

*продолжение приложения 10*

2000	55	2	15.2	1.19	4	0	0	19.2	0.35	3.6	3.6	100	15	0.773	-9.9	0	0
2000	56	2	16.6	1.2	3	0	0	20.6	0.38	3.4	3.4	100	15	0.829	-9.9	0	0
2000	57	2	13	1.21	0	0	0	22.2	0.4	2.5	2.5	100	15	0.89	-9.9	0	0
2000	58	2	13.1	1.22	0	0	0	23.9	0.43	2	2	100	15	0.954	-9.9	0	0
2000	59	2	14	1.24	1	0	0	25.8	0.46	3.6	3.6	100	15	1.023	-9.9	0	0
2000	60	2	15.4	1.25	6	0	0	27.6	0.49	4.6	4.6	100	15	1.096	-9.9	0	0
2000	61	2	15.6	1.26	8	0	0	29.6	0.52	5.1	5.1	100	15	1.173	-9.9	0	0
2000	62	2	14.8	1.27	4	0	0	31.8	0.55	3.5	3.5	100	15	1.255	-9.9	0	0
2000	63	2	14.9	1.29	10	0	0	34.1	0.58	5.1	5.1	100	15	1.342	-9.9	0	0
2000	64	2	15.8	1.3	9	0	0	36.5	0.61	6.1	6.1	100	15	1.434	-9.9	0	0
2000	65	2	14.2	1.31	8	0	0	39.1	0.64	6.5	6.5	100	15	1.53	-9.9	0	0
2000	66	3	12.9	1.32	8	0	0	41.9	0.68	5.8	5.8	100	15	1.632	-9.9	0	0
2000	67	3	13.2	1.34	12	0	0	44.7	0.72	6.1	6.1	100	15	1.74	-9.9	0	0
2000	68	3	12.9	1.35	15	0	0	47.6	0.75	6.2	6.2	100	15	1.852	-9.9	0	0
2000	69	3	14.4	1.36	23	0	0	50	0.78	7.3	7.3	100	15	1.969	-9.9	0	0
2000	70	3	14.8	1.37	21	0	0	52.4	0.8	6.1	6.1	100	14.3	2.084	1.6	0.033	0.01
2000	71	3	15.1	1.38	21	0	0	54.6	0.83	8.6	8.6	100	14.2	2.201	1.7	0.038	0.01
2000	72	3	15.3	1.4	26	0	0	56.5	0.85	8.2	8.2	100	14	2.32	1.9	0.044	0.01
2000	73	3	13.7	1.41	18	0	0	58.6	0.87	7.1	7.1	100	13.8	2.44	2.1	0.051	0.01
2000	74	3	12.3	1.42	22	0	0	60.4	0.89	6.7	6.7	100	13.6	2.561	2.3	0.059	0.02
2000	75	3	12.1	1.43	25	0	0	62.1	0.91	6.2	6.2	100	13.5	2.683	2.5	0.068	0.02
2000	76	3	11.5	1.44	25	0	0	63.6	0.92	5.4	5.4	100	13.3	2.806	2.8	0.077	0.02
2000	77	3	13	1.45	26	0	0	65.1	0.93	7.5	7.5	100	13.1	2.929	3	0.088	0.02
2000	78	3	14.2	1.47	38	0	0	66.1	0.94	8.3	8.3	100	13	3.051	3.3	0.101	0.03
2000	79	3	14.6	1.48	36	0	0	67.2	0.95	9.6	9.6	100	12.8	3.173	3.6	0.115	0.03
2000	80	3	16.1	1.49	52	0	0	67.8	0.96	10.1	10.1	100	12.6	3.295	4	0.132	0.03
2000	81	3	15.3	1.5	69	1	0	68.2	0.96	10.1	10	99	12.5	3.414	4.4	0.15	0.04
2000	82	3	14.4	1.5	68	0	0	68.5	0.97	7.8	7.8	100	12.3	3.533	4.8	0.17	0.04
2000	83	3	13.7	1.5	44	0	0	69.2	0.97	6.8	6.8	100	12.1	3.651	5.3	0.192	0.04

*продолжение приложения 10*

2000	84	3	14.3	1.5	54	0	0	69.8	0.98	6.7	6.7	100	12	3.768	5.7	0.216	0.05
2000	85	3	14.5	1.5	55	0	0	70.3	0.98	8.7	8.7	100	11.8	3.884	6.3	0.243	0.05
2000	86	3	13.9	1.5	76	4	0	70.4	0.98	9.1	8.8	96	11.6	3.994	6.8	0.273	0.06
2000	87	3	13.7	1.5	99	14	0	70.4	0.98	9.1	7.8	86	11.5	4.09	7.5	0.305	0.06
2000	88	3	16.2	1.5	100	26	0	70.4	0.98	9.8	7.2	74	11.3	4.172	8.1	0.338	0.07
2000	89	3	16.2	1.5	100	34	2	70.4	0.98	9.6	6.3	66	11.1	4.244	8.8	0.374	0.08
2000	90	3	15.3	1.5	100	23	0	70.4	0.98	9.9	7.6	77	11	4.326	9.5	0.413	0.08
2000	91	3	14.6	1.5	100	32	1	70.3	0.98	9.8	6.7	68	10.8	4.399	10.3	0.452	0.09
2000	92	3	13.4	1.5	100	17	0	70.3	0.98	8.6	7.2	83	10.6	4.485	11	0.493	0.09
2000	93	3	14.3	1.5	97	14	0	70.3	0.98	6.3	5.4	86	10.5	4.574	11.7	0.537	0.1
2000	94	3	13.6	1.5	95	13	0	70.3	0.98	8.3	7.2	87	10.5	4.664	12.5	0.582	0.11
2000	95	3	14.6	1.5	100	31	1	70.3	0.98	10.4	7.2	69	10.5	4.736	13.2	0.626	0.11
2000	96	3	14.6	1.5	100	39	4	70.2	0.98	10.3	6.3	61	10.5	4.799	14	0.67	0.12
2000	97	3	14.1	1.5	100	23	0	70.2	0.98	9	6.9	77	10.5	4.878	14.7	0.717	0.13
2000	98	3	12.7	1.5	100	28	0	70.2	0.98	8.2	5.9	72	10.5	4.953	15.4	0.765	0.13
2000	99	3	12.4	1.5	91	11	0	70.2	0.98	7.4	6.6	89	10.5	5.044	16.2	0.817	0.14
2000	100	3	13.9	1.5	100	18	0	70.2	0.98	7.2	5.9	82	10.5	5.128	16.9	0.868	0.15
2000	101	3	14.7	1.5	97	13	0	70.2	0.98	8.4	7.2	87	10.5	5.217	17.7	0.923	0.15
2000	102	3	14.8	1.5	100	25	0	70.1	0.98	9	6.7	75	10.5	5.294	18.4	0.976	0.16
2000	103	3	15.1	1.5	100	34	2	70.1	0.98	9.1	6	66	10.5	5.362	19.2	1.028	0.17
2000	104	3	14.5	1.5	100	20	0	70.1	0.98	8.5	6.8	80	10.5	5.443	19.9	1.084	0.17
2000	105	3	14.1	1.5	100	27	0	70.1	0.98	8.2	5.9	73	10.5	5.518	20.7	1.14	0.18
2000	106	3	13.4	1.5	100	18	0	70.1	0.98	8.4	6.9	82	10.5	5.602	21.4	1.2	0.19
2000	107	3	13	1.5	100	25	0	70.1	0.98	8	6	75	10.5	5.679	22.2	1.259	0.19
2000	108	3	14.3	1.5	100	18	0	70.1	0.98	8.8	7.2	82	10.5	5.763	22.9	1.321	0.2
2000	109	3	15.3	1.5	100	29	0	70.1	0.98	9.3	6.6	71	10.5	5.835	23.7	1.381	0.21
2000	110	3	14.6	1.5	100	38	4	70	0.97	9.6	5.9	62	10.5	5.899	24.4	1.439	0.21
2000	111	3	14.5	1.5	-9	44	7	68.8	0.95	8.9	5	56	10.5	5.954	25.1	1.497	0.22
2000	112	3	14.9	1.5	-9	31	1	68.6	0.94	8.8	6	69	10.5	6.022	25.9	1.557	0.23

*продолжение приложения 10*

2000	113	3	15.6	1.5	-9	38	4	68.3	0.94	8.4	5.2	62	10.5	6.083	26.6	1.616	0.23
2000	114	3	12.7	1.5	-9	19	0	68	0.93	6.7	5.4	81	10.5	6.162	27.3	1.681	0.24
2000	115	3	12.8	1.5	-9	30	0	67.7	0.92	7.3	5.1	70	10.5	6.23	28	1.745	0.25
2000	116	4	13.6	1.5	-9	36	3	67.3	0.91	7	4.5	64	10.5	6.291	28.7	1.807	0.25
2000	117	4	13.6	1.5	-9	46	8	66.9	0.9	7.9	4.3	54	10.5	6.342	29.4	1.866	0.26
2000	118	4	14.3	1.5	-9	53	12	66.5	0.89	8.1	3.8	47	10.5	6.386	30.1	1.923	0.27
2000	119	4	10.4	1.5	-9	53	12	66.1	0.88	6.2	2.9	47	10.5	6.429	30.8	1.981	0.27
2000	120	4	12.1	1.5	-9	33	1	65.6	0.87	6.4	4.3	67	10.5	6.49	31.5	2.046	0.28
2000	121	4	13.8	1.5	-9	42	5	65.1	0.85	6.9	4	58	10.5	6.543	32.2	2.108	0.28
2000	122	4	11.4	1.5	-9	44	6	64.6	0.84	5.9	3.3	56	10.5	6.592	32.9	2.171	0.29
2000	123	4	12.4	1.5	-9	54	12	64	0.83	6.8	3.2	46	10.5	6.632	33.6	2.23	0.3
2000	124	4	12.4	1.5	-9	60	17	63.3	0.81	7	2.8	40	10.5	6.666	34.3	2.287	0.3
2000	125	4	12.7	1.5	-9	65	23	62.4	0.79	7.2	2.5	35	10.5	6.695	35	2.342	0.31
2000	126	4	12.3	1.5	-9	68	29	61.4	0.77	7.2	2.3	32	10.5	6.72	35.7	2.396	0.31
2000	127	4	5.3	1.5	-9	61	20	60.4	0.74	3.8	1.5	39	10.5	6.751	36.3	2.453	0.32
2000	128	4	6.2	1.5	-9	68	27	59.2	0.72	5	1.6	32	10.5	6.775	37	2.507	0.33
2000	129	4	13	1.5	-9	72	32	57.8	0.69	5.6	1.6	28	10.5	6.795	37.7	2.559	0.33
2000	130	4	0.6	1.5	-9	58	14	56.7	0.67	1.2	0.5	42	10.5	6.825	38.4	2.617	0.34
2000	131	4	0	1.5	-9	59	15	55.5	0.64	1.1	0.5	41	10.5	6.853	39	2.675	0.35
2000	132	4	0	1.5	-9	68	26	53.9	0.61	2.8	0.9	32	10.5	6.873	39.7	2.729	0.35
2000	133	4	3.5	1.5	-9	73	35	52.1	0.57	3.9	1	27	10.5	6.889	40.4	2.781	0.36
2000	134	4	5.7	1.5	-9	74	36	50	0.53	3.4	0.9	26	10.5	6.904	41	2.832	0.37
2000	135	4	8.8	1.5	-9	76	40	47.7	0.49	3.5	0.8	24	10.5	6.916	41.7	2.882	0.37
2000	136	4	8.8	1.5	-9	79	44	45.2	0.45	3.7	0.8	21	10.5	6.926	42.3	2.93	0.38
2000	137	4	11.1	1.5	-9	79	45	42.5	0.4	3.1	0.6	21	10.5	6.935	42.9	2.978	0.38
2000	138	4	11	1.5	-9	80	46	39.4	0.35	2.6	0.5	20	10.5	6.942	43.6	3.026	0.39
2000	139	4	12.8	1.5	-9	81	48	36.1	0.3	2.4	0.5	19	10.5	6.948	44.2	3.072	0.4
2000	140	4	13.1	1.5	-9	82	51	32.5	0.24	2.1	0.4	18	10.5	6.952	44.8	3.118	0.4
2000	141	4	6.6	1.5	-9	78	41	28.5	0.19	0.9	0.2	22	10.5	6.957	45.5	3.165	0.41

продолжение приложения 10

2000	142	4	1.8	1.5	-9	73	33	24.3	0.14	0.3	0.1	27	10.5	6.961	46.1	3.212	0.41
2000	143	4	0	1.5	-9	70	26	20	0.1	0.2	0	30	10.5	6.964	46.8	3.26	0.42
2000	144	4	0	1.5	-9	67	23	15.5	0.06	0.1	0	33	10.5	6.966	47.5	3.308	0.42
2000	145	4	0	1.5	-9	69	25	10.4	0.03	0	0	31	10.5	6.967	48.2	3.355	0.43
2000	146	4	0	1.5	-9	71	30	4.7	0.01	0	0	29	10.5	6.967	48.8	3.401	0.44
2000	147	4	0	1.5	-9	-9	36	0	0	0	0	100	10.5	6.967	48.8	3.401	0.44
2000	148	-9	1.6	1.5	-9	-9	36	0	0	0	0	100	10.5	6.967	48.8	3.401	0.44
2000	149	-9	6	1.5	-9	-9	36	0	0	0	0	100	10.5	6.967	48.8	3.401	0.44
2000	150	-9	8.1	1.5	-9	-9	36	0	0	0	0	100	10.5	6.967	48.8	3.401	0.44
2000	151	-9	4.6	1.5	-9	-9	36	0	0	0	0	100	10.5	6.967	48.8	3.401	0.44
2000	152	-9	3.4	1.5	-9	-9	36	0	0	0	0	100	10.5	6.967	48.8	3.401	0.44
2000	153	-9	5.5	1.5	-9	-9	36	0	0	0	0	100	10.5	6.967	48.8	3.401	0.44

\*Для оптимизации некоторые столбцы таблицы сокращены

- DAP : Days after planting  
 Stage : 0: before/after planting  
 Stage : 1: emergence or transplant recovery  
 Stage : 2: vegetative stage  
 Stage : 3: flowering  
 Stage : 4: yield formation and ripening  
 GD : Growing degrees  
 Z : Effective rooting depth  
 StExp : Percent water stress reducing leaf expansion  
 StSto : Percent water stress inducing stomatal closure  
 StSen : Percent water stress triggering early canopy senescence  
 CC-Est : Estimated Green Canopy Cover  
 Kc(Tr) : Crop coefficient for transpiration  
 Trx : Maximum crop transpiration  
 Tr : Crop transpiration  
 Tr/Trx : Relative crop transpiration (100 Tr/Trx)  
 WP : Crop water productivity adjusted for CO<sub>2</sub>, soil fertility and products synthesized

StBio : Percent temperature stress affecting biomass production  
AGB : Cumulative biomass produced  
HI : Harvest Index adjusted for failure of pollination, inadequate photosynthesis and water stress  
Yield Part : Yield (HI x Biomass)  
WPet : ET Water productivity for yield part (kg yield produced per m<sup>3</sup> water evapotranspired)

Funded by:



Led By:



Partners:

