

REFERENCES

- Bouma J. Using soil survey data for quantitative land evaluation // *Advances in Soil Science*, 1989, no. 9, pp. 177–213.
- Klute A., Dirksen C. Hydraulic conductivity of saturated soils // *Methods of Soil Analysis / Klute A. (Ed.)*, 1986, ASA&SSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 694–700.
- Mady A. Y., Shein E. V. Modeling soil thermal diffusivity as a function of soil moisture // *Bulletin of the Orenburg State University*, 2016, v. 200, no. 12, pp. 56–60.
- Schaap M. G., Leij F. J., van Genuchten M. T. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions // *Journal of Hydrology*, 2001, no. 251, pp. 163–176.
- Shein E. V., Mady A. Y., El Hassna A. M. Soil Saturated Hydraulic Conductivity Assessment by Direct and Pedotransfer Functions Methods // *Biogeosystem Technique Journal*, 2015, v. 6, no. 4, pp. 396–400.
- Walczak R. T., Moreno F., Salwinski C., Fernandez E., Arrue J. L. Modeling of Soil Water retention curve using Soil Solid phase parameters // *J. Hydrology*, 2006, v. 329, no. 3–4, pp. 527–533.
- Wösten J. H. M., Finke P. A., Jansen M. J. W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics // *Geoderma*, 1995, no. 66, pp. 227–237.
- Wosten J. H., Lilly A., Nemes A., Le Bas C., Wosten J.H.M., Otto H. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils // *Geoderma*, 1999, v. 90, no. 3–4, pp. 169–185.

УДК 631:004.942.001.57:551.584.43:551.573

Doi: 10.25695/AGRPH.2018.01.06

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РОСТА И РАЗВИТИЯ AQUACROP НА ПОСЕВАХ РАПСА В ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

И. Л. Максенкова, А. В. Доброхотов, Л. В. Козырева

*ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14
E-mail: 4ludak@gmail.com*

Поступила в редакцию 26 декабря 2017 г., принята к печати 26 февраля 2018 г.

В рамках настоящего исследования проведена параметрическая идентификация модели роста и развития посевов сельскохозяйственных культур AquaCrop, разработанной Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (FAO). В данной модели для конкретных культур в определенных почвенно-экологических условиях в масштабе поля с временным интервалом в одни сутки определяется зависимость величины сухой надземной биомассы от кумулятивной относительной транспирации. Калибровка модели AquaCrop проведена на посевах рапса сорта «Оредеж-4» в пос. Дивенский (59°11'N, 30°00'E) с использованием данных измерений автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК) и ручных измерений, собранных в специально созданную информационную базу данных. Для расчета ежедневных суточных метеорологических величин были использованы данные ближайшей метеостанции Белогорка (59°21'N, 30°08'E). Построены регрессионные зависимости метеорологических параметров с метеостанции Белогорка и данных с АМПАК. С помощью регрессионных зависимостей получены непрерывные ряды суточных метеопараметров над посевом рапса в пос. Дивенский в вегетационном сезоне 2017 г. Проведены расчеты суточной транспирации (T_T) и эталонной эвапотранспирации (E_{T0}), а также калибровка зависимости сухой надземной биомассы от кумулятивной суммы отношения транспирации к эталонной эвапотранспирации во времени и пространстве (дни вегетационного периода и неоднородность сельскохозяйственного поля) с учетом особенностей микроклимата поля. С помощью статистического анализа продемонстрирована эффективность модели роста и развития посевов рапса в Ленинградской области.

Ключевые слова: сухая биомасса, эвапотранспирация, транспирация, влагообеспеченность посевов, модель AquaCrop.

PARAMETERIZATION OF THE AQUACROP MODEL FOR SIMULATING CROP GROWTH AND DEVELOPMENT OF RAPESEED IN THE LENINGRAD REGION

I. L. Maksenkova, A. L. Dobrokhoto, L. V. Kozyreva

The paper discusses the parameterization of the AquaCrop model developed by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The AquaCrop model allows estimations of crop water productivity on a daily time scale by simulating aboveground dry biomass value as a function of cumulative daily normalized transpiration. Here, the calibration of the AquaCrop model was carried out for a rapeseed field (variety «Oredej-4») in the Divenskiy village (59°11'N, 30°00'E) using data measured by an Automated Mobile Field Agrometeorological Equipment (AMFAE) and manual measurements collected in a special information database. The data of the nearest meteorological station (Belogorka, 59°21'N, 30°08'E) were used for establishing representative daily values of the daily transpiration (T_d) and daily reference evapotranspiration (ET_0) on the rapeseed field in the Divenskiy village. To this aim, linear regression relationships between the weather data from the Belogorka meteorological station and the data from AMFAE were established. The calibration of the water productivity was carried out both in time (for a growing season) as well as in space (heterogeneous agricultural field) considering the microclimate of the field. Statistical analysis confirmed the efficiency of the AquaCrop model for estimating growth and development of rapeseed in the Leningrad region.

Key words: dry biomass, evapotranspiration, transpiration, crop moisture availability, AquaCrop model.

ВВЕДЕНИЕ

Первые исследования по моделированию урожайности культур в зависимости от агрометеорологических условий, а также других почвенных и растительных параметров были начаты в 60-х годах прошлого столетия в США, Нидерландах и СССР. Среди отечественных ученых значительный вклад в моделирование продуктивного процесса внесли Х. Г. Тооминг, Р. А. Полуэктов и О. Д. Сиротенко (Тооминг, 1984; Сиротенко, 1981; Полуэктов и др., 2006).

Из зарубежных исследований известны такие модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур, как CERES и EPIC (Mearns et al., 1999). В современной аграрной науке наиболее распространены модели типа DSSAT (Decision Support for Agrotechnology Transfer (Jones et al., 2003; Thorp et al., 2008), которые используются для информационной и технической поддержки точного земледелия.

Модель CROPWAT (Smith, 1992) предназначена для прогноза конечного урожая в зависимости от агрометеорологического ресурса – суммарного испарения. Суммарное испарение оказывает непосредственное влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур, поскольку является связующей составляющей водного и теплового балансов агроэкологических систем.

AquaCrop – распространенная модель роста и развития посевов сельскохозяйственных культур (Steduto et al., 2009), разработанная Продовольственной и

сельскохозяйственной организацией ООН (Food and Agriculture Organization of the United Nations Organisation (FAO)). AquaCrop позволяет в зависимости от продуктивности транспирации растений проводить в масштабе поля мониторинг роста и развития конкретных посевов в определенных почвенно-экологических условиях с временным интервалом в одни сутки. Целью данного исследования являлась калибровка модели AquaCrop на опытном поле рапса, т. е. определение коэффициентов регрессионной модели посева рапса. Для этого были проведены измерения прироста сухой надземной биомассы в зависимости от кумулятивного отношения реальной транспирации к испаряемости эталонной поверхности в период вегетации с временным суточным шагом при учете региональных особенностей микроклимата поля.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Калибровочный эксперимент проводился на участке площадью 4 м² с посевом рапса сорта Оредеж-4 в пос. Дивенский Ленинградской области (59°11'N, 30°00'E). Расстояние между рядами посевов составляло 0,15 м, между растениями в ряду – 0,02 м. Дата посадки – 11 июня 2017 г. Всходы появились 16 июня. Рост и развитие рапса происходили при оптимальных почвенных условиях. Сухая наземная биомасса высушивалась до постоянного веса в трехкратной повторности, взвешивание проводилось на электронных весах с точностью 0,01 г. Пробы надземной биомассы отбирались 23.06.17; 02.07.17; 07.07.17; 15.07.17; 21.07.17; 23.07.17 – в

начале и по окончании сбора данных автоматизированных измерений метеорологических параметров. В указанные даты также фотографировали растительную поверхность и автоматически определяли проективное покрытие (СС) по программе, разработанной в АФИ. Одновременно выполнялись необходимые ручные измерения фенологических и физиологических характеристик посева рапса. Измерение агрометеорологических характеристик посева рапса выполнялось с помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК) (Ефимов и др., 2013). В процессе проведения эксперимента с интервалом 90 сек. измерялись следующие физические величины: аэродинамическая температура (датчик HEL-705-U-1-12-C2, Honeywell International, Inc.) и влажность воздуха (датчик НН-4602-С, Honeywell International, Inc) на двух высотах, атмосферное давление (MPX4115AP, Honeywell International, Inc.) и скорость ветра на высоте 2 м (датчик Windgeschwindigkeitssensor, НИМ), радиометрическая температура над растительностью и над почвой (датчик Optiris GmbH, СТ LT), радиационный баланс поверхности (Балансомер, АФИ), суммарная радиация (Пиранометр Янишевского), объемная влажность почвы на глубине 10 см (датчик Decagon Devices 10HS) и температуры почвы на разных глубинах (датчик HEL-705-U-1-12-C2, Honeywell International, Inc.). Информация о высоте над поверхностью почвы, на которой размещались датчики, заносилась в базу данных АМПАКа.

Главная гипотеза модели AquaCrop (Steduto et al., 2009) состоит в том, что интенсивность роста биомассы прямо

$$CC \leq CC_x/2: CC = CC_0 e^{tCGC}, \quad (2)$$

$$CC > CC_x/2: CC = CC_x - 0,25(CC_x^2 / CC_0) \times e^{-tCGC}, \quad (3)$$

где CGC – коэффициент увеличения растительной поверхности в вегетационный период, %·день⁻¹; CC_x – максимальное проективное покрытие; CC_0 – начальное проективное покрытие при появлении 90% всходов; t – дни вегетационного периода

пропорциональна нормализованной транспирации и выражена уравнением:

$$B = WP^* \left(\sum \frac{T_r}{ET_0} \right), \quad (1)$$

где WP^* – продуктивность транспирации, выражающая взаимосвязь между ростом сухой надземной биомассы и транспирацией в региональных климатических условиях, г м⁻²; $\sum(T_r/ET_0)$ – суммарная суточная нормализованная транспирация в вегетационный период (от начала посева до уборки урожая); B – надземная сухая биомасса, г м⁻²; T_r – транспирация, мм; ET_0 – эталонная эвапотранспирация, мм сут⁻¹.

Для расчета WP^* в модели предусмотрен учет концентрации CO₂ в атмосфере. В настоящей работе калибровка нормализованной величины WP^* производилась при концентрации CO₂ в воздухе – 369,41 ppm, и соответствующий коэффициент в расчетах равен единице (Steduto et al., 2007). В исследовании (Raes et al., 2009.) установлено, что относительная WP^* является постоянной величиной для определенного типа посевов, климата и региона.

В модели AquaCrop в качестве количественной характеристики роста используется сухая надземная биомасса растения, а в качестве характеристики развития посевов – высота растений и проективное покрытие (СС). Проективное покрытие является основным параметром в модели AquaCrop, который изменяется в течение вегетационного периода.

Для расчета и моделирования проективного покрытия (СС) в алгоритме AquaCrop предусмотрено два варианта в зависимости от его текущей величины (Raes et al., 2009):

посева.

Эталонная эвапотранспирация (ET_0) рассчитывается по формуле Пенмана – Монтейса с соответствующими параметрами согласно методике FAO-56 (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \quad (4)$$

где Δ – параметр, выражающий зависимость насыщения водяного пара от температуры воздуха, кПа; R_n – радиационный баланс, МДж м⁻²·час⁻¹; G – поток тепла в почву, МДж м⁻²·час⁻¹; γ – психрометрическая постоянная, кПа; T – температура воздуха на уровне 2 м, °С; u_2 – скорость ветра на уровне 2 м, м с⁻¹; e_s – давление насыщения водяного пара, кПа; e_a – давление водяного пара, кПа.

Величину транспирации (T_r) возможно определить при помощи нескольких методов, например модели разделения эвапотранспирации на транспирацию и физическое испарение с почвы (TSEB) (Norman et al., 1995). В основе модели лежит идея определения составляющих энергетического баланса растительности и почвы с использованием фундаментального закона сохранения солнечной энергии на поверхности сельскохозяйственного поля. Модель позволяет вычислять скрытые и явные потоки на растительной поверхности и почве. TSEB учитывает влияние неоднородности растительного покрова, используя величину проективного покрытия. Апробация модели и алгоритм расчета более подробно описаны в исследовании (Козырева и др., 2016). Второй метод предложен К. Т. Zeleke и L. J. Wade (2012). Он заключается в определении транспирации (T_r) через коэффициенты растительности (K_{cb}), эталонную эвапотранспирацию и соответствующую величину проективного покрытия (CC). Формулы для расчета приведены ниже.

$$T_r = K_{cb} \times ET_0, \quad (5)$$

$$K_{cb} = K_{cb(x)} \times CC, \quad (6)$$

где $K_{cb(x)} = 0,95$ – значение коэффициента рапса при сомкнутом растительном покрове.

В настоящей работе расчет транспирации (T_r) осуществлен по методу Пристли-Тейлора (Zhang et. al., 2004) с модельными значениями проективного покрытия (CC):

$$T_r = CC \times a_c \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} R_n, \quad (7)$$

где a_c – коэффициент Пристли – Тейлора, принимаемый равным 1,26.

Полученную надземную сухую конечную биомассу (B) с помощью индекса урожайности (HI) можно пересчитать на хозяйственный биологический урожай (U). Таким образом, данная модель может быть использована в эконометрике. Например, прогноз урожайности позволит оптимизировать затраты на применение различных агроприемов, а также оценить стоимость и прибыль от собранного урожая. В модели AquaCrop предусмотрен учет не только водного и почвенного, но и питательного стресса – путем расчета и ввода соответствующих коэффициентов. Водный стресс не только влияет на развитие посева, но также регулирует устьичную проводимость и, следовательно, определяет транспирацию посева (Доброхотов и др., 2017). Исследования в данной области будут продолжены в дальнейшем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Калибровка модели AquaCrop была проведена с помощью программного интерфейса базы данных АМПАКА, созданного в Агрофизическом институте (Козырева, 2016).

Полученные и собранные в базу данные о температуре и влажности воздуха, скорости ветрового потока, а также атмосферном давлении в дни измерений надземной биомассы рапса осреднены и представлены на рис. 1. Временной интервал мониторинга роста и развития посева рапса был равен 43-м суткам до момента достижения максимального проективного покрытия (фаза цветения). Продолжение эксперимента оказалось невозможным из-за неблагоприятных погодных условий (ливень и сильный ураган).

Для получения непрерывного ряда суточных метеорологических величин были использованы данные ближайшей метеостанции Белогорка (59°21'N, 30°08'E). Были построены регрессионные зависимости метеорологических параметров с метеостанции Белогорка и данных с АМПАКа (рис. 2), при помощи которых были определены значения ежедневных

суточных метеовеличин над посевом рапса в пос. Дивенский.

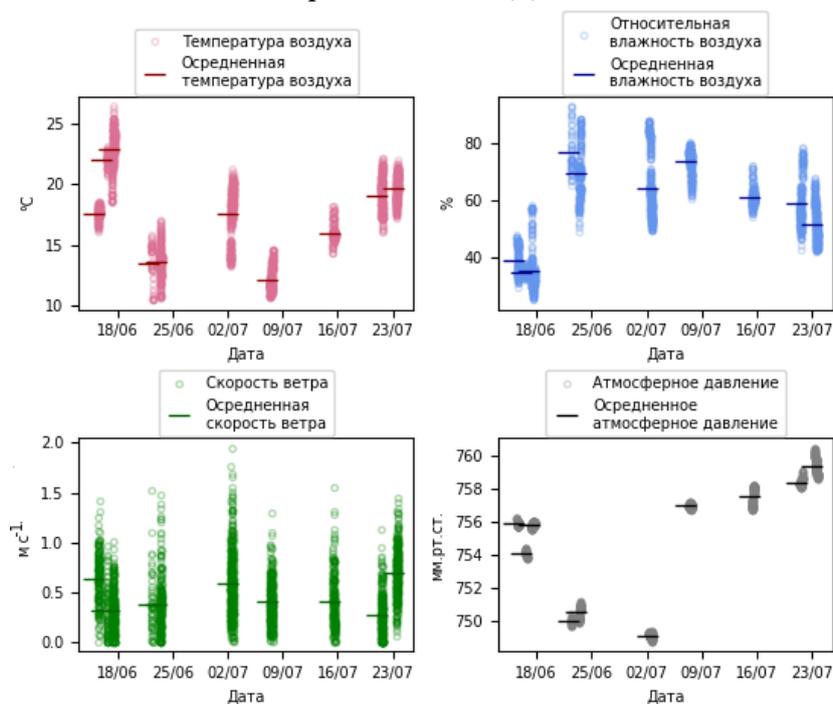


Рис. 1. Метеорологические параметры над участком рапса, измеренные АМПАК за 90 секунд и осредненные

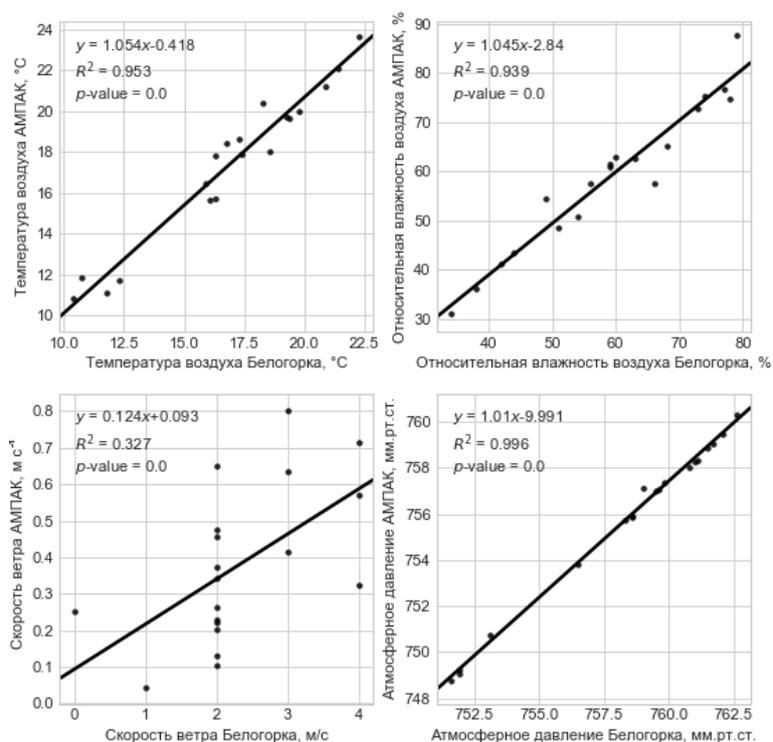


Рис. 2. Уравнения и параметры регрессии для метеорологических данных с метеостанции Белогорка и с АМПАК

Полученные значения суточных метеовеличин над посевом рапса в пос. Дивенский, рассчитанные по уравнениям регрессии, представлены на рис. 3.

Далее с использованием построенных временных рядов температуры,

относительной влажности воздуха, давления приземного слоя воздуха и скорости ветрового потока был проведен расчет величин суточной транспирации (T_r) по формулам (5)–(6) через коэффициент K_{cb} и по формуле Пристли – Тейлора (7).

Эталонная эвапотранспирация (ET_0) Монтейса (4) (рис. 4).
 рассчитывалась по формуле Пенмана –

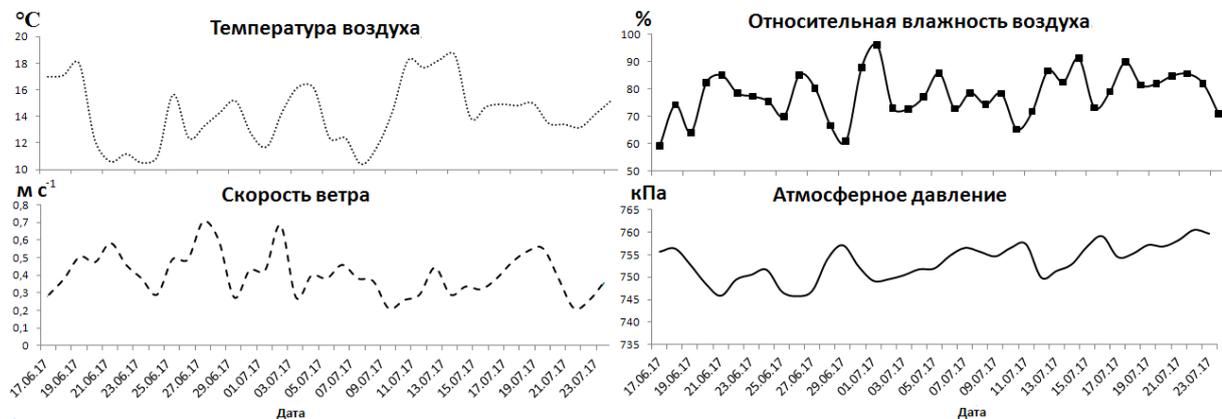


Рис. 3. Входные данные температуры воздуха, относительной влажности воздуха, скорости ветра и атмосферного давления для модели AquaCrop

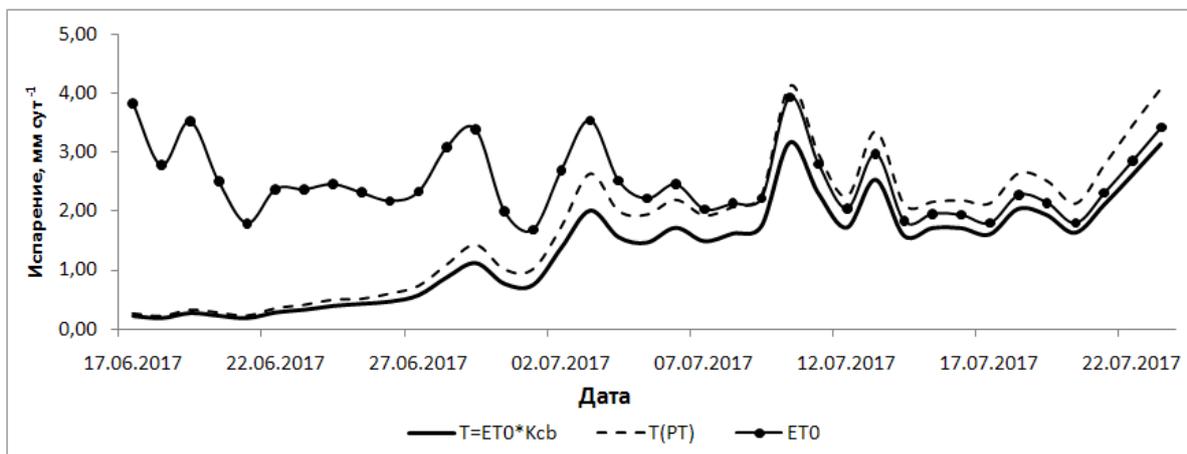


Рис. 4. График значений транспирации (T_r), рассчитанной двумя методами, и эталонной эвапотранспирации (ET_0) над участком рапса в пос. Дивенский за исследуемый период с суточным временным шагом

Для расчета транспирации (T_r) была построена модель проективного покрытия (CC) по формулам (2)–(3). При определении параметров модели проективного покрытия была использована программа определения проективного покрытия (Ефимов и др., 2013), получающая на входе фотографии подстилающей растительной поверхности. Таким образом, при построении модели проективного покрытия (CC) был рассчитан коэффициент увеличения растительной

поверхности (CGC). Полученное значение CGC равно $0,13\% \text{ день}^{-1}$ (рис. 5).

При помощи полученных данных была рассчитана калибровочная регрессионная зависимость измеренной сухой надземной биомассы от суммированной нормализованной транспирационной воды ($\sum(T_r/ET_0)$) (рис. 6а). На рис. 6б представлены измеренные и вычисленные по регрессионной модели AquaCrop показатели сухой надземной биомассы.

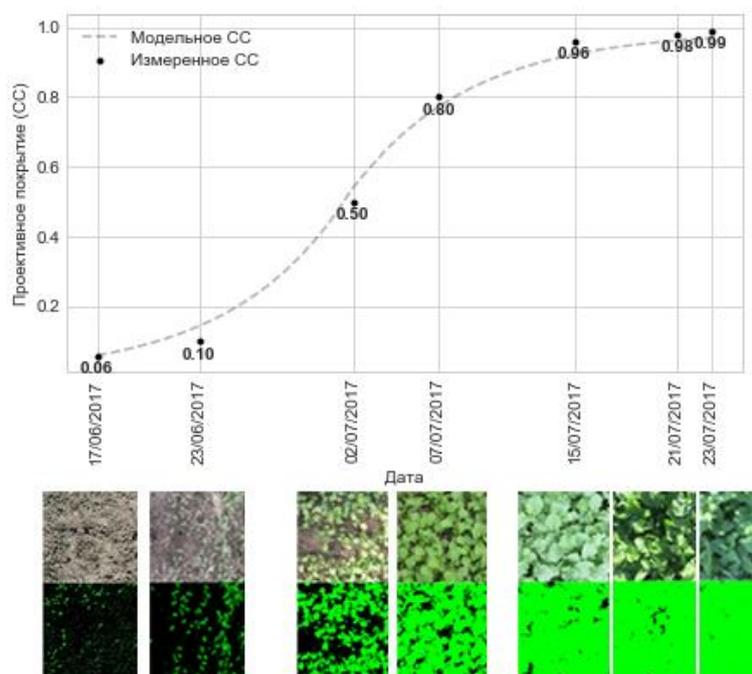


Рис. 5. Модельное и измеренное проективное покрытие посева рапса в пос. Дивенский (вверху); фотографии и изображения, полученные при помощи программы определения проективного покрытия (внизу)

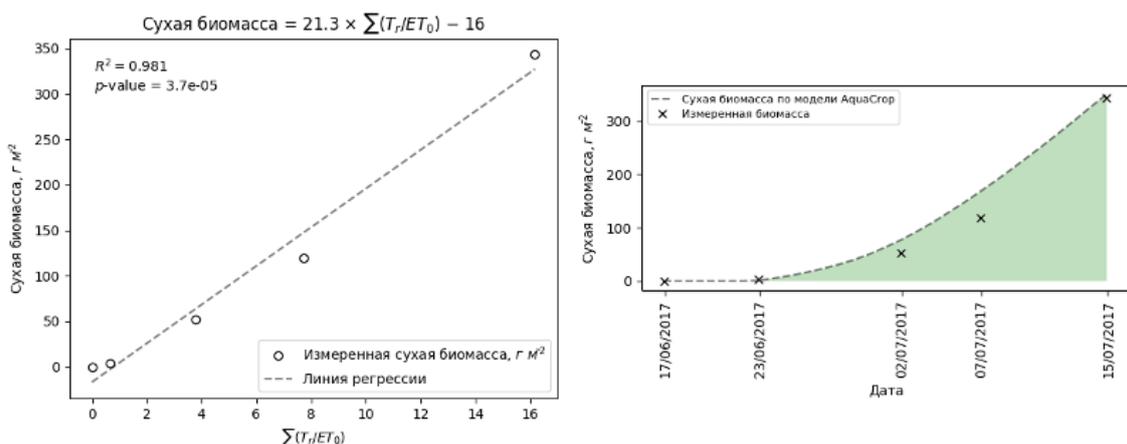


Рис. 6. а) Регрессионная модель зависимости сухой надземной биомассы от суммированной нормализованной транспирационной воды ($\sum(T_r/ET_0)$); б) Измеренные и рассчитанные по модели AquaCrop показатели надземной сухой биомассы

В исследованиях других авторов получены следующие значения WP^* : для рапса $WP^* = 18,6 \text{ г м}^{-2}$ (Zelege, Wade, 2012), для хлопка – $19,8 \text{ г м}^{-2}$ (Farahani et al., 2009), для кукурузы – $33,7 \text{ г м}^{-2}$ (Heng et al., 2009), для ячменя – 13 г м^{-2} (Araya et al., 2010).

В настоящем исследовании в результате расчетов получено значение продуктивности транспирации (WP^*), равное $21,3 \text{ г м}^{-2}$ и находящееся на границе диапазона значений WP для культур типа С3 ($15\text{--}20 \text{ г м}^{-2}$), к которым относится рапс.

Для оценки полученной регрессионной модели был проведен статистический анализ с использованием следующих статистических показателей: 1) значение среднеквадратической ошибки RMSE (Root-

Mean-Square Error) - $17,423 \text{ г м}^{-2}$; 2) индекс согласия d (Index of Agreement), равный $0,984$, свидетельствует о хорошем согласии моделируемых и рассчитанных значений; 3) индекс NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) $0,981$ подтверждает высокую эффективность модели; 4) коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,991$ свидетельствует о наличии функциональной положительной связи.

ВЫВОДЫ

По данным автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК), метеостанции Белогорка и ручных измерений с помощью созданного программного интерфейса была проведена

калибровка продуктивности транспирации посевов рапса (модель AquaCrop) в пос. Дивенский Ленинградской области.

Построенные регрессионные модели проективного покрытия и сухой биомассы с суточным интервалом позволяют проводить мониторинг роста и развития посевов сельскохозяйственных культур в вегетационный период.

Получена оценка зависимости сухой надземной биомассы от кумулятивной суммы отношения транспирации к эталонной

эвапотранспирации во времени с учетом региональных особенностей микроклимата полей. Проведена оценка эффективности регрессионной модели.

Разработанная схема калибровки модели с помощью данных автоматизированного комплекса и сетевых метеорологических станций и построение соответствующих регрессионных зависимостей позволяют получать сведения, необходимые для мониторинга роста и развития различных посевов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Доброхотов А. В., Максенкова И. Л., Козырева Л. В., Шандор Р. Модельная оценка пространственного распределения устьичной проводимости у кормовых трав // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 3. С. 446–453.
- Ефимов А. Е., Доброхотов А. В., Козырева Л. В., Ситдикова Ю. Р. Автоматизированный мобильный полевой агрометеорологический комплекс (АМПАК). Методические указания для использования. СПб.: АФИ. 2013. 32 с.
- Козырева Л. В., Доброхотов А. В., Ефимов А. Е., Максенкова И. Л., Бартнев Д. Л. Информационная база данных автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса для модельных расчетов энерго- и массообмена на сельскохозяйственном поле. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 201760487 05.12.2016.
- Козырева Л. В., Доброхотов А. В., Ефимов А. Е., Максенкова И. Л. Разделение суммарного испарения на транспирацию и испарение почвы с применением данных автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК) и двухуровневой энергобалансовой модели TSEB // *Агрофизика*. 2016. № 3. С. 23–32.
- Полужков Р. А., Смоляр Э. И., Терлесев В. В., Топаж А. Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: изд-во С.-Петербург. ун-та, 2006. 396 с.
- Сиротенко О. Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем Л.: Гидрометеиздат, 1981. Т. 167. 168 с.
- Тооминг Х. Г. Экологические принципы максимальной продуктивности посевов Л., Гидрометеиздат. 1984. Т. 264. 31 с.
- Allen R. G. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56 // FAO, Rome, 1998, v. 30, no. 9, 328 p.
- Araya A., Habtu S., Hadgu K. M., Kebede A., Dejene T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*) // *Agricultural Water Management*, 2010, v. 97, no. 11, pp. 1838–1846.
- Farahani H. J., Izzi G., Oweis T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton // *Agronomy journal*, 2009, v. 101, no. 3, pp. 469–476.
- Heng L. K., Hsiao T., Evett S., Howell T., Steduto P. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize // *Agronomy Journal*, 2009, v. 101, no. 3, pp. 488–498.
- Jones J. W., Hoogenboom G., Porter C. H., Boote K. J., Batchelor W. D., Hunt L. A., Wilkens P. W., Singh U., Gijsman A. J., Ritchie J. T. DSSAT Cropping System Model // *European Journal of Agronomy*, 2003, v. 18, no. 3, pp. 235–265.
- Mearns L. O. Comparative responses of EPIC and CERES crop models to high and low spatial resolution climate change scenarios // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, v. 104, no. 6, pp. 6623–6646.
- Norman J. M., Kustas W. P., Humes K. S. Transactions of the ASABE approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature // *Agric. Forest Meteorol.*, 1995, v. 77, no. 3–4, pp. 263–293.
- Raes D., Steduto P., Hsiao Th. C., Elías F. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description // *Agronomy Journal*, 2009, v. 101, no. 3, pp. 438–447.
- Smith M. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. Food & Agriculture Org., 46.1992.
- Steduto P., Hsiao T. C., Raes D., Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles // *Agronomy Journal*, 2009, v. 101, no. 3, pp. 42–437.
- Steduto P., Hsiao T. C., Fereres E. On the conservative behavior of biomass water productivity // *Irrigation Science*, 2007, v. 25, no. 3, pp. 18–207.
- Thorp K. R., DeJonge K. C., Kaleita A. L., Batchelor W. D., Paz J. O. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support // *Computers and electronics in agriculture*, 2008, v. 64, no. 2, pp. 27–285.

- Zelege K. T., Wade L. J. Evapotranspiration estimation using soil water balance, weather and crop data // Evapotranspiration – Remote Sensing and Modeling. In Tech, 2012. DOI: 10.5772/17489.
- Zhang Y., Liu C., Yu Q., Shen Y., Kendy E., Kondoh A., Sun H. Energy fluxes and Priestly – Taylor parameter over winter wheat and maize in the North China Plain // Hydrol. Process, 2004, v. 18, no. 12, pp. 2235–2246.

REFERENCES

- Dobrokhotov A. V., Maksenkova I. L., Kozyreva L. V., Shandor R. Model'naiia otsenka prostranstvennogo raspredeleniia ust'ichnoi provodimosti u kormovykh trav [Experimental research of stomatal regulation of transpiration using data from automated mobile field agrometeorological equipment]. *Sel'skokhoziaistvennaia biologiia*, 2017, v. 52, no. 3, pp. 446–453.
- Efimov A. E., Dobrokhotov A. V., Kozyreva L. V., Sitdikova Iu. R. Avtomatizirovannyi mobil'nyi polevoi agrometeorologicheskii kompleks (AMPAK). *Metodicheskie ukazaniia dlia ispol'zovaniia* [Automated mobile field agrometeorological equipment (AMFAE). Methodical instruction for use]. St.-Petersburg: Agrophysical Research Institute Publishing, 2013. 32 p.
- Kozyreva L. V., Dobrokhotov A. V., Efimov A. E., Maksenkova I. L., Bartenev D. L. *Informatsionnaia baza dannykh avtomatizirovannogo mobil'nogo polevogo agrometeorologicheskogo kompleksa dlia model'nykh raschetov energo-i massoobmena na sel'skokhoziaistvennom pole* [Information data base of automated mobile field agrometeorological equipment for energy and mass exchange modeled calculations on agricultural field]. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlia EVM RUS 201760487 05.12.2016.
- Kozyreva L. V., Dobrokhotov A. V., Efimov A. E., Maksenkova I. L. Razdelenie summarnogo ispareniiia na transpiratsiiu i isparenie pochvy s primeneniem dannykh avtomatizirovannogo mobil'nogo polevogo agrometeorologicheskogo kompleksa (AMPAK) i dvukhurovnevoi energobalansovoi modeli TSEB [Partitioning of evapotranspiration for transpiration and evaporation from the soil using data from automated mobile field agrometeorological equipment and TSEB model]. *Agrofizika*, 2016, no. 3, pp. 23–32.
- Poluektov R. A., Smoliar E. I., Terleev V. V., Topazh A. G. *Modeli produktsionnogo protsessa sel'skokhoziaistvennykh kul'tur* [Models of plant production processes]. St.-Petersburg: St.-Petersburg University Publishing, 2006. 396 p.
- Sirotenko O. D. *Matematicheskoe modelirovanie vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agroekosistem* [Mathematic modeling of water and heat regime and agro ecosystems productivity]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, v. 167, 168 p.
- Tooming Kh. G. *Ekologicheskie printsipy maksimal'noi produktivnosti posevov* [Ecological principles of maximum crop productivity]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, v. 264, 31 p.
- Allen R. G. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 // FAO, Rome, 1998, v. 30, no. 9, 328 p.
- Araya A., Habtu S., Hadgu K. M., Kebede A., Dejene T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*) // *Agricultural Water Management*, 2010, v. 97, no. 11, pp. 1838–1846.
- Farahani H. J., Izzi G., Oweis T. Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton // *Agronomy journal*, 2009, v. 101, no. 3, pp. 469–476.
- Heng L. K., Hsiao T., Evett S., Howell T., Steduto P. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize // *Agronomy Journal*, 2009, v. 101, no. 3, pp. 488–498.
- Jones J. W., Hoogenboom G., Porter C. H., Boote K. J., Batchelor W. D., Hunt L. A., Wilkens P. W., Singh U., Gijsman A. J., Ritchie J. T. DSSAT Cropping System Model // *European Journal of Agronomy*, 2003, v. 18, no. 3, pp. 235–265.
- Mearns L. O. Comparative responses of EPIC and CERES crop models to high and low spatial resolution climate change scenarios // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, v. 104, no. 6, pp. 6623–6646.
- Norman J. M., Kustas W. P., Humes K. S. Transactions of the ASABE approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature // *Agric. Forest Meteorol.*, 1995, v. 77, no. 3–4, pp. 263–293.
- Raes D., Steduto P., Hsiao Th. C., Elías F. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description // *Agronomy Journal*, 2009, v. 101, no. 3, pp. 438–447.
- Smith M. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. Food & Agriculture Org., 46.1992.
- Steduto P., Hsiao T. C., Raes D., Fereres E. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles // *Agronomy Journal*, 2009, v. 101, no. 3, pp. 42–437.
- Steduto P., Hsiao T. C., Fereres E. On the conservative behavior of biomass water productivity // *Irrigation Science*, 2007, v. 25, no. 3, pp. 18–207.
- Thorp K. R., DeJonge K. C., Kaleita A. L., Batchelor W. D., Paz J. O. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support // *Computers and electronics in agriculture*, 2008, v. 64, no. 2, pp. 27–285.
- Zelege K. T., Wade L. J. Evapotranspiration estimation using soil water balance, weather and crop data // Evapotranspiration-Remote Sensing and Modeling. In Tech, 2012. DOI: 10.5772/17489.
- Zhang Y., Liu C., Yu Q., Shen Y., Kendy E., Kondoh A., Sun H. Energy fluxes and Priestly – Taylor parameter over winter wheat and maize in the North China Plain // *Hydrol. Process*, 2004, v. 18, no. 12, pp. 2235–2246.