Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга

А. М. Зейлигер¹, О. С. Ермолаева¹, Е. Л. Музылев²,
З. П. Старцева², Ю. И. Сухарев¹

¹ *Российский государственный аграрный университет —
МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, 127550, Россия
E-mail: azeiliger@mail.ru*

² *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия
E-mail: muzylev@iwp.ru*

Представлены результаты компьютерного анализа режимов водного стресса орошаемых посевов люцерны, кукурузы и сои на уровне отдельного агроценоза с использованием SWAP-модели. Для сопоставления результатов компьютерного моделирования водного стресса с биопродуктивностью были использованы данные подспутникового полевого мониторинга, проведённого в 2012 г. на полях ряда хозяйств, расположенных на территории Саратовского Заволжья. В результате были выявлены связи рассчитанных величин накопленного за период вегетации водного стресса отдельных посевов с их урожайностью. Компьютерная модель SWAP, использованная для расчёта водного стресса, включала блоки описания водного и теплового режимов для системы «атмосфера—агроценоз—почва—грунтовые воды», а также массивы данных для формирования граничных условий и гидравлических характеристик почвенно-грунтовой толщи. Массивы данных, воспроизводящие граничные условия на дневной поверхности, были сформированы по результатам наземного и космического мониторинга, а также диспетчерского контроля реализации поливов сельскохозяйственных посевов. Параметры гидравлических характеристик почвенно-грунтовой толщи были рассчитаны по аддитивным моделям строения почв с использованием данных физико-механических характеристик.

Ключевые слова: сельскохозяйственные посевы, орошение, эвапотранспирация, подстилающий слой, водный стресс, дистанционное зондирование, MODIS

Одобрена к печати: 25.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43

Введение

Новые сквозные цифровые технологии управления водопотреблением орошаемых агроценозов (ОА), направленные на эффективное использование природных ресурсов, предлагают широкие возможности для развития орошаемого земледелия (Hongjun et al., 2018; Mannini et al., 2013; Wenchao et al., 2017; Yanfei et al., 2018). Они основаны на сочетании цифровых технологий: а) компьютерного моделирования роста и развития посевов сельскохозяйственных культур (Голованов, 1993; Добрачев и др., 1988; Зейлигер, Ермолаева, 2016а; Feddes 1987); б) геоинформационных систем (ГИС) (Зейлигер, Ермолаева, 2016б; Шульга и др., 2016); в) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Зейлигер, Ермолаева, 2016б; Шульга и др., 2016); г) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) (Зейлигер, 2010; Шульга и др., 2016). Такое сочетание позволяет на каждом конкретном орошаемом поле формировать влагозапасы его корнеобитаемого слоя в соответствии с выбранной стратегией использования поливной воды для получения запланированного урожая посева сельскохозяйственной культуры в складывающихся погодных условиях. Это становится возможным за счёт ассимиляции цифровой информации — гидрометеорологического мониторинга и прогноза, дистанционного зондирования характеристик приземного слоя атмосферы (ПСА) и подстилающей поверхности (ПП) — в компьютерных системах моделирования и управления ростом, развитием и водопотреблением орошаемых агроценозов для последующего применения цифровых данных технологических предписаний роботизированной оросительной техникой.

Исследования по реализации компьютерного моделирования водопотребления агроценозов основаны на применении физико-математических моделей вертикального влаго- и теплообмена ПП с ПСА (Голованов, 1993; Добрачев и др., 1988; Музылев и др., 2017; Bastiaanssen et al., 2005; Feddes, 1987; Gowda et al., 2008; Muzylev et al., 2018).

Основу семейства SWAP-моделей составляют уравнения влагопереноса и теплопроводности в системе «почва—вода—атмосфера—растение» (Feddes, 1987; Kroes et al., 2017) с соответствующими граничными условиями. Последние характеризуют взаимодействие запасов влаги и тепла, а также корневой системы растительного покрова, которые находятся в почвенно-грунтовой толще, с окружающим его на верхней и нижней границах внешним пространством. Параметры этих моделей являются функциями: а) гидравлических характеристик почвенно-грунтовой толщи, зависящих от энергетического состояния её слоёв; б) вегетационных характеристик ОА, зависящих от вегетационной фазы развития и гидрометеорологических характеристик. Переменными на верхней границе являются гидрометеорологические характеристики, в число которых входят температура и влажность воздуха, атмосферное давление, осадки, скорость ветра и суммарная солнечная радиация, а также температура подстилающей поверхности. Переменные на нижней границе зависят от динамики уровня грунтовых вод, вызванной как боковой приточностью/отточностью под влиянием локального осушения/обводнения, так и региональным гидрогеологическим трендом.

Ассимиляция в SWAP-модели данных ДЗЗ производится для участка земной поверхности, занятого моделируемым ОА. В свою очередь, это позволяет рассчитывать сопряжённую с данными ДЗЗ динамику влагозапасов в почвенно-грунтовой толще, расположенной под земной поверхностью ОА, а также эвапотранспирацию и другие характеристики водного и теплового режимов. В результате это даёт возможность рассчитывать вегетационные характеристики роста и развития ОА, а также его водопотребление и урожай биомассы (Голованов, 1993; Добрачев и др., 1988; Зейлигер, Ермолаева, 2016а; Шульга и др., 2016; Feddes, 1987).

Определяющим фактором для успешного практического использования SWAP-моделей для управления орошением ПСА является использование в них объективных данных ДЗЗ (Bastiaanssen et al., 2005; Bezerra et al., 2015; Gowda et al., 2008; Overgaard, 2006). Привлечение этих данных обеспечивает детализацию результатов расчётов характеристик водного и теплового режимов и приводит к существенному повышению их точности (Музылев и др., 2017). В конечном итоге ассимиляция в SWAP-модели данных ДЗЗ моделируемого ОА существенно повышает качество, оперативность и надёжность диагностического и прогностического моделирования. Это реализуется путём верификации и адаптации результатов моделирования водопотребления, эвапотранспирации и влагозапасов корнеобитаемого слоя с использованием разработанного метода, основанного на расчёте динамики коэффициента водного стресса ОА.

Орошаемые агроценозы Саратовского Заволжья

Исследования по оценке коэффициента водного стресса ОА проводились для орошаемых посевов люцерны, кукурузы и сои, которые выращивались в вегетационный сезон 2012 г. на территории Саратовского Заволжья в соседствующих Марксовском и Энгельском районах Саратовской области. В качестве примера на *рис. 1* (см. с. 35) представлены картограммы с указанием мест расположения посевов люцерны (обведены окружностями или прямоугольниками разного цвета). Названия посевов соответствуют номенклатуре дождевальных машин кругового действия, использованных соответствующими хозяйствами (ЗАО «Волга», ЗАО «Трудовой», ЗАО «Мелиоратор», ОПХ «ВолжНИИГиМ» и ЗАО «Березовский») для их обозначения.

Климат обоих районов относится к континентально-засушливому с холодной зимой и жарким летом. Продолжительность безморозного периода — 150–160 календарных дней. Сумма активных температур составляет 2600–2800 °С, что достаточно для выращивания широкого круга сельскохозяйственных культур. Снеговой покров отмечается с ноября по конец марта—начало апреля. Преобладающие направления ветра — северо-восточный и западный. Среднегодовое количество осадков на этих территориях составляет 400–450 мм (боль-

шая часть выпадает в тёплое время года), и их зачастую недостаточно для получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур. Для восполнения этого недостатка в Саратовском Заволжье в 70-х гг. XX в. был построен ряд крупных оросительных систем, на сохранившихся и восстановленных частях которых в настоящее время ведётся и развивается орошаемое земледелие.

Рис. 1. Места расположения и номенклатурные названия посевов орошаемой люцерны в вегетационный период 2012 г.: а — территория Приволжской ОС (Марковский район), хозяйства ЗАО «Волга», ЗАО «Трудовой», ЗАО «Мелиоратор»; б — ЗАО «Березовский» (Энгельский район); в — ОПХ «ВолжНИИГиМ» (Энгельский район)

Почвенный покров обоих районов представлен тёмно-каштановыми почвами, формирующими общий фон. Грунтовые воды залегают в основном ниже 10 м, однако на отдельных участках, где ведётся сельскохозяйственное орошение, их уровень расположен на глубинах 2–3 м. Следствием зачастую является деградация почвенного покрова в результате его засоления и осолонцевания минерализованными грунтовыми водами. Это приводит к снижению потенциальной биопродуктивности деградированных орошаемых земель и, соответственно, недополучению урожая сельскохозяйственных культур.

Оценка эвапотранспирации с использованием SWAP-модели, данных гидрометеорологического мониторинга и данных спектрорадиометра MODIS

Разработанный метод оценки коэффициента водного стресса K_w посева сельскохозяйственной культуры в условиях отсутствия экологического стресса (засоление почв) основан на выражении (Allen et al., 1998):

$$K_w = \frac{ET_a}{ET_c}, \quad (1)$$

где ET_a — актуальная суточная эвапотранспирация или эвапотранспирация посева сельскохозяйственной культуры в текущих условиях водопотребления; ET_c — суточная эвапотранспирация посева сельскохозяйственной культуры в условиях оптимального водопотребления, т.е. при отсутствии дефицита влагозапасов, приводящего к водному стрессу.

Значение входящей величины суточной эвапотранспирации посева сельскохозяйственной культуры в условиях оптимального водопотребления ET_c зависит от метеорологических характеристик погодных условий, фазы развития посева, а также ряда факторов, оказывающих влияние на снижение суммарного испарения (Allen et al., 1998). Для случая отсутствия

факторов, снижающих суммарное испарение, была предложена следующая зависимость ET_c от ET_0 (Allen et al., 1998):

$$ET_c = K_c \cdot ET_0, \quad (2)$$

где K_c — эмпирический коэффициент водопотребления сельскохозяйственной культуры, учитывающий её вид и вегетационные особенности, а также фазу развития; ET_0 — эталонная суточная эвапотранспирация с поверхности эталонного травяного покрова, в корнеобитаемом слое которого имеется объём почвенной влаги, необходимый для оптимального водопотребления.

Приведённая зависимость (2), описывающая связь между ET_c и ET_0 в достаточно простом и удобном для практического использования виде, хорошо обеспечена большим объёмом данных независимых исследований (Allen et al., 1998). Это позволяет использовать её для мониторинга текущего состояния посевов сельскохозяйственных культур, а так же для оценок настоящих (Yoder et al., 2005) и будущих (Ababaei, 2014) потребностей в воде.

В разработанном методе расчёт значений коэффициента водного стресса производится для суточного масштаба времени. С этой целью для территорий, занятых ОА, используются данные стандартных наземных гидрометеорологических измерений (температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость ветра) и данные измерений радиометра MODIS/EOS Terra и Aqua.

Расчёт временных суточных рядов эталонной эвапотранспирации ET_0 был основан на методе Пенмана. В этих расчётах, реализуемых на стадии предпроцессинга, предшествующей процессингу SWAP-модели, использовались величины суточных гидрометеорологических рядов данных, которые были получены на метеостанциях городов Маркс и Энгельс для периода вегетации ОА 2012 г. Результаты были сведены в массив входных данных суточных значений $\{ET_0\}^t$.

Расчёт суточных значений ET_c , основанный на методике ФАО-56 (Allen et al., 1998), проводился по выражению (2) на стадии предпроцессинга для всего периода вегетации ОА. Для этого использовались эмпирические коэффициенты водопотребления фаз вегетационного роста и развития соответствующей сельскохозяйственной культуры. Результаты этих расчётов также были сведены в массив входных данных суточных значений $\{ET_c\}^t$.

В дополнение к рядам входных данных, сформированных по наземным гидрометеорологическим измерениям, использовались ряды суточных значений температур подстилающей поверхности (ТПП). Эти ряды были рассчитаны по измерениям радиометра MODIS для участков земной поверхности ОА (Зейлигер, Ермолаева, 2016а; Su, 2002), использованных в последующем процессинге модели SWAP.

Расчёт суточных значений ET_a был реализован на стадии процессинга SWAP-модели. Для формирования граничного условия на дневной поверхности почвенного покрова дополнительно к сформированным рядам значений $\{ET_0\}^t$, $\{ET_c\}^t$ и ТПП использовались ряды дат и норм выпадения осадков, а также сроков проведения поливов ОА и соответствующих им норм. Получаемые в результате процессинга SWAP-модели суточные значения ET_a сводились в массив выходных данных $\{ET_a\}^t$. В этих расчётах были использованы гидравлические характеристики почв, рассчитанные по аддитивным моделям строения почв (Воронин, Зейлигер, 1988; Зейлигер, 1995; Клиб и др., 2007; Zeiliger, 1992; Zeiliger et al., 2000) с использованием данных измерений физико-механических свойств горизонтов почвенно-грунтового профиля.

На заключительном постпроцессинговом этапе расчёта коэффициента водного стресса с использованием выражения (1) проводилось вычисление суточных значений $\{K_w\}^t$.

Результаты пространственно-временного анализа эвапотранспирации

Расчёты водного и теплового режимов в вегетационный период 2012 г. с использованием SWAP-модели были проведены для 17 посевов люцерны (большинство из них — второго года вегетации), 9 посевов кукурузы и 10 посевов сои.

Рис. 2. Агрометеорологические характеристики посевов орошаемой люцерны в поливной период 2012 г.: а — ЗАО «Трудовое» и ОПХ «Волжский», б — ЗАО «Волга», ЗАО «Мелиоратор», ЗАО «Березовский» и ОПХ «Волжский»

В качестве примера на *рис. 2* (см. с. 37) представлено графическое отображение сопряжённых во времени временных рядов суточных значений температур воздуха, дат и норм выпадения осадков, сроков и норм поливов, а также рассчитанных (на предпроцессинговом этапе) величин эталонной $\{ET_0\}'$ и актуальной $\{ET_a\}'$ эвапотранспирации и (на постпроцессинговом этапе) коэффициента водного стресса посевов орошаемой люцерны $\{K_w\}'$.

На обеих частях представленных на *рис. 2* графиков в качестве основы для сравнения красными линиями отображены рассчитанные ряды коэффициента водного стресса посевов люцерны на территории ОПХ «ВолжНИИГиМ» с целью их визуального сопоставления с рассчитанными рядами посевов люцерны, которые располагались на территориях других хозяйств. На каждом из этих посевов было получено по три укоса: первый был проведён в первой декаде июня, второй — в первой декаде июля и третий — во второй декаде августа.

Анализ приведённых данных свидетельствует, с одной стороны, о схожести между собой, а с другой — об отличии друг от друга сформированных на посевах люцерны в поливной период 2012 г. режимов водного стресса. Схожесть ряда режимов водного стресса во многом связана с хозяйственной принадлежностью соответствующих посевов, что приводило, по-видимому, и к единообразному проведению поливов в практически одни и те же сроки и с одними и теми же поливными нормами. Это достаточно убедительно подтверждается ходом графиков посевов на территориях ЗАО «Трудовой», ОПХ «ВолжНИИГиМ», ЗАО «Мелиоратор» и др. В то же время разница режимов водного стресса внутри отмеченных групп, выделенных по единообразному управлению поливами, по видимому, связана с различием почвенных и гидрологических условий участков территорий, где выращивались соответствующие посевы орошаемой люцерны.

Была проведена оценка влияния созданных режимов водного стресса посевов орошаемой люцерны, кукурузы и сои на урожайность на основе собранных данных. В качестве характеристики сформированного в результате реализации поливного режима на каждом из этих посевов режима водного стресса были использованы средние за поливной сезон (15.05.2012—15.08.2012) значения коэффициентов водного стресса.

Для получения второй характеристики эффективности реализованных поливных режимов были взяты данные урожайности зелёной массы посевов, предоставленные хозяйствами. Эти величины были пересчитаны в урожайности органического углерода всех трёх культур. Затем рассчитанные урожайности посевов и средние значения коэффициентов водного стресса были использованы для оценки корреляционных зависимостей отдельно для каждой сельскохозяйственной культуры. Результаты этой оценки в графическом виде представлены на *рис. 3*.

Рис. 3. Корреляционные зависимости между урожайностью и средним коэффициентом водного стресса за поливной период (19.05.2012—11.08.2012) орошаемых посевов: *a* — люцерны; *б* — кукурузы; *в* — сои

Полученные линейные корреляции между урожайностью орошаемых посевов трёх сельскохозяйственных культур и средним за поливной период значением коэффициента водного стресса свидетельствуют о наличии достаточно тесных связей между урожайностью биомассы этих культур и сформированным при этом в результате орошения режимом водного стресса.

Детализированный анализ представленных рядов данных посевов сельскохозяйственных культур по их принадлежности показывает, что единообразное управление их орошением приводит к получению близких значений урожайностей. При этом такое единообразие приводит к группировке урожайностей (от высоких до низких) по хозяйствам. Примером группировки высоких урожайностей посевов всех трёх культур служит ОПХ «ВолжНИИГиМ», где орошаемое земледелие, и в частности орошение в 2012 г., велось на достаточно высоком технологическом уровне.

Другим образцом использования результатов SWAP-моделирования, противоположным группировке по принадлежности, является анализ различий внутри групп. Примером этому могут служить полученные данные для двух рядом расположенных посевов люцерны (Фр3 и Фр5), принадлежавших ЗАО «Волга». Значения рядов коэффициента водного стресса обоих посевов до конца июня практически не отличались друг от друга (см. *рис. 2*). Однако в результате временного выхода из строя оросительной техники на одном из посевов (Фр5) не удалось выполнить запланированный полив, что привело к продолжительному увеличению периода водного стресса и в итоге — к снижению урожайности третьего укоса в сравнении с другим посевом (Фр3).

Заключение

Проведённые исследования по применению SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга показали эффективность использования разработанного метода для анализа результативности орошения посевов сельскохозяйственных культур.

Дальнейшее развитие разработанного метода будет направленно на использование SWAP-модели (или её более простых аналогов) в совокупности с прогнозными гидрометеорологическими данными и данными аэрокосмического мониторинга для целей оперативного управления орошаемыми агроценозами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-05-01097 «Водопотребление агроценозов на «точечном» и «площадном» уровнях исследований») и за счёт финансирования Программы фундаментальных исследований № 19 Президиума РАН (проект № 0147-2018-0006 «Воды суши и динамика экосистем: механизмы взаимодействия, эволюция»).

Литература

1. Воронин А. Д., Зейлигер А. М. Моделирование структуры порового пространства почв. 1. Расчет основной гидрофизической характеристики почв по механическому и микроагрегатному составу почв // Почвоведение. 1988. № 4. С. 49–59.
2. Голованов А. И. Оптимизация режимов орошения черноземов // Почвоведение. 1993. № 6. С. 79–84.
3. Добрачев Ю. П., Кузнецова Н. А., Лобачев С. Б., Бурдюгов В. Г. Оптимизация режима орошения с помощью имитационной модели // Мелиорация и водное хозяйство. 1988. № 4. С. 46–50.
4. Зейлигер А. М. Структурные модели почв и их гидрофизические характеристики: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 1995. 38 с.
5. Зейлигер А. М. Точное (дифференцированное) орошаемое земледелие — технология повышения эффективности орошения и снижения нагрузки на окружающую среду // Инновационные технологии повышения эффективности мелиоративных систем и безопасности гидротехнических сооружений: сб. тр. ГНУ ПНИИЭМТ, 2010. Т. 2. С. 664–668.
6. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. (2016а) Результаты компьютерного моделирования водного стресса посевов орошаемой люцерны по данным наземного метеорологического и космического мониторингов температуры подстилающего слоя с использованием методики ФАО-56 и модели SEBS // Экология. Экономика. Информатика. 2016. С. 258–273.
7. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. (2016б) Информационные технологии в мониторинге богарных и орошаемых агроценозов // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 10 (часть 1). С. 62–66.

8. Клиб Е. Г., Затицацкий С. В., Зейлигер А. М., Хитров Н. Б. Сравнительные исследования достоверности аддитивной модели агрегированных почв для характеристики водоудерживания чернозема обыкновенного // Вестн. Саратовского гос. аграрного ун-та им. Н. И. Вавилова. 2007. № 2. С. 20–23.
9. Музылев Е. Л., Старцева З. П., Успенский А. Б., Волкова Е. В., Василенко Е. В., Кухарский А. В., Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136.
10. Шульга Е. Ф., Курпиров А. О., Хлюстов В. К., Балабанов В. И., Зейлигер А. М. Управление сельхоз-предприятием с использованием космических средств навигации (ГЛОНАСС) и дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. 282 с.
11. Ababaei B. Are weather generators robust tools to study daily reference evapotranspiration and irrigation requirement? // Water Resources Management. 2014. V. 28. Iss. 4. P. 915–932.
12. Allen R. G., Pereira L., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements / FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998. 15 p.
13. Bastiaanssen W. G. M., Noordman E. J. M., Pelgrum H., Davids G., Thoreson B. P., Allen R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions // J. Irrigation and Drainage Engineering. 2005. V. 131. No. 1. P. 85–93.
14. Bezerra B. G., Silva B. B., Santos C. A. C., Bezerra J. R. C. Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: comparison of SEBAL and SSEB approaches // Advanced Remote Sensing. 2015. V. 4. No. 3. P. 234–247.
15. Feddes R. A. Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration // Technical Bull. Inst. for Land and Water Management Research. 1987. No. 39. P. 33–45.
16. Gowda P. H., Chavez J. L., Colaizzi P. D., Evette S. R., Howell T. A., Tolk J. A. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges // Irrigation Science. 2008. V. 26. P. 223–237.
17. Hongjun L., Jiazhen L., Yanjun S., Xiying Z., Yuping L. Web-based irrigation decision support system with limited inputs for farmers // Agricultural Water Management. 2018. V. 210(C). P. 279–285.
18. Kroes J. G., Van Dam J. C., Bartholomeus R. P. SWAP version 4: Theory description and user manual / Wageningen Environmental Research. Report 2780. 2017. 285 p.
19. Mannini P., Genovesi R., Letterio T. IRRINET: Large Scale DSS Application for On-farm Irrigation Scheduling // Procedia Environmental Sciences. 2013. V. 19. P. 823–829.
20. Muzylev E. L., Zeyliger A. M., Startseva Z. P., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Ermolaeva O. S. Modeling Processes of Water and Heat Regime Formation for Agricultural Region Area (Russia) Utilizing Satellite Data // Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources: proc. 1st Springer Conf. Arabian J. Geosciences (CAJG-1). Tunisia, 2018. P. 37–39.
21. Overgaard J., Rosbjerg J. D., Butts M. B. Land-Surface Modeling in Hydrological Perspective — a Review // Biogeosciences. 2006. V. 3. P. 229–241.
22. Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent Heat Fluxes // Hydrology and Earth System Sciences. 2002. No. 6. P. 85–100.
23. Wenchao W., Yuanlai C., Yufeng L., Zenghuan L., Junwei T. Web-based decision support system for canal irrigation management // Computers and Electronics in Agriculture. 2017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.018>.
24. Yanfei M., Shaomin L., Lisheng S., Ziwei X., Yaling L., Tongren X., Zhongli Z. Estimation of daily evapotranspiration and irrigation water efficiency at a Landsat-like scale for an arid irrigation area using multi-source remote sensing data // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 216. P. 715–734.
25. Yoder R. E., Odhiambo L. O., Wright W. C. Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States // Applied Engineering in Agriculture. 2005. V. 21. P. 197–202.
26. Zeiliger A. M. A Hierarchical System to Model the Pore Structure of Soils: Indirect Methods for Evaluating the Hydraulic Properties // Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils: proc. / eds. M. Th. van Genuchten, F. J. Leij, L. J. Lund. Riverside: University of California, 1992. P. 499–514.
27. Zeiliger A. M., Pachepsky Ya. A., Rawls W. J. Estimating water retention of sandy soils using the additivity hypothesis // Soil Sciences. 2000. V. 165. No. 5. P. 373–383.

Computer analysis of water stress regimes of an irrigated agrocoenosis using the SWAP model and ground and space monitoring data

A. M. Zeyliger¹, O. S. Ermolaeva¹, E. L. Muzylev²,
Z. P. Startseva², Yu. I. Sukharev¹

¹ Russian State Agrarian University —
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow 127550, Russia
E-mail: azeiliger@mail.ru

² Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia
E-mail: muzylev@iwp.ru

Results of computer modeling of water stress regimes of the irrigated alfalfa, corn and soya bean crops at the level of a specific agrocoenosis are presented. The SWAP model has been used for the analysis. Comparison of the results of the computer modeling of water stress with bioproductivity has been made on the basis of the data of ground monitoring carried out concurrently with satellite survey in 2012 in the fields of the farms located in Saratov Zavolzhye region. As a result, the correlation between the calculated values of the accumulated water stress of specified crops during vegetation period and the data of their productivity was revealed. The computer model used for calculation of water stress included blocks describing water and heat fluxes in the atmosphere – agrocoenosis – soil – ground waters system, as well as datasets of soil boundary conditions and parameters of soil hydrological characteristics. The datasets describing boundary conditions at soil surface were created from the results of ground and space monitoring, and also information from crops irrigation operational management. Parameters of hydrological characteristics of soil layers were calculated with the help of additive models of soil structure with the use of physical-mechanical characteristics of a soil texture.

Keywords: agricultural crop, irrigation, evapotranspiration, underlying layer, water stress, remote sensing, GIS, MODIS

Accepted: 25.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43

References

1. Voronin A. D., Zeiliger A. M., Modelirovanie struktury porovogo prostranstva pochv. 1. Raschet osnovnoi gidrofizicheskoi kharakteristiki pochv po mekhanicheskomu i mikroagregatnomu sostavu pochv (Modeling the structure of the pore space of soils. 1. Calculation of the main hydrophysical characteristic of soil from particle-size and micro aggregate analysis), *Pochvovedenie*, 1988, No. 4, pp. 49–59.
2. Golovanov A. I., Optimizatsiya rezhimov orosheniya chernozemov (Optimization of the irrigation of chernozem regimes), *Pochvovedenie*, 1993, No. 6, pp. 79–84.
3. Dobrachev Yu. P., Kuznetsova N. A., Lobachev S. B., Burdyugov V. G., Optimizatsiya rezhima orosheniya s pomoshch'yu imitatsionnoi modeli (Optimization of the mode of irrigation by means of imitating model), *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 1988, No. 4, pp. 46–50.
4. Zeiliger A. M., *Strukturnye modeli pochv i ikh gidrofizicheskie kharakteristiki: Avtoref. diss. dokt. biol. nauk* (Structural models of soils and their hydrophysical characteristics, Ext. abstract Dr. biol. sci. thesis), Moscow: MGU, 1995, 38 p.
5. Zeiliger A. M., Tochnoe (differentsirovannoe) oroshaemoe zemledelie — tekhnologiya povysheniya effektivnosti orosheniya i snizheniya nagruzki na okruzhayushchuyu sredu (Precision (differential) irrigated agriculture — technology to improve irrigation efficiency and reduce the influence on the environment), *Innovatsionnye tekhnologii povysheniya effektivnosti meliorativnykh sistem i bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*, 2010, Vol. 2, pp. 664–668.
6. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S. (2016a), Rezul'taty komp'yuternogo modelirovaniya vodnogo stressa posevov oroshaemoi lyutserny po dannym nazemnogo meteorologicheskogo i kosmicheskogo monitoringov

- temperature podstilyayushchego sloya s ispol'zovaniem metodiki FAO-56 i modeli SEBS (Results of computer modeling of a water stress of crops of the irrigated lucerne according to land meteorological and space monitoring of temperature of the spreading layer with use of a technique of FAO-56 and the SEBS model), *Ekologiya. Ekonomika. Informatika*, 2016, Vol. 2, pp. 258–273.
7. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S. (2016b), Informatsionnye tekhnologii v monitoringe bogarnykh i oroshayemykh agrotsenozov (Information technologies in monitoring of the bogarny and irrigated agrocenosis), *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, Vol. 10-1, pp. 62–66.
8. Klib E. G., Zatinatskii S. V., Zeiliger A. M., Khitrov N. B., Sravnitel'nye issledovaniya dostovernosti additivnoi modeli agregirovannykh pochv dlya kharakteristiki vodouderzhivaniya chernozema obyknovennogo (Comparative researches of reliability of additive model of the aggregated soils for the characteristic of water keeping of the chernozem ordinary), *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. N. I. Vavilova*, 2007, No. 2, pp. 20–23.
9. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspensky A. B., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Kukharsky A. V., Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya modelirovaniya vodnogo i teplovogo rezhimov sel'skikh territorii (Using remote sensing data to model water and heat regimes of rural territories), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 108–136.
10. Shulga E. F., Kupriyanov A. O., Khlyustov V. K., Balabanov V. I., Zeiliger A. M., *Upravlenie sel'khozpredpriyatiem s ispol'zovaniem kosmicheskikh sredstv navigatsii (GLONASS) i distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Management of agricultural enterprise with use of space navigation aids (GLONASS) and remote sensing of Earth), Moscow: Izd. RGAU-MSHA, 2016, 282 p.
11. Ababaei B., Are weather generators robust tools to study daily reference evapotranspiration and irrigation requirement? *Water Resources Management*, 2014, Vol. 28, No. 4, pp. 915–932.
12. Allen R. G., Pereira L., Raes D., Smith M., *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome: FAO, 1998, 15 p.
13. Bastiaanssen W. G. M., Noordman E. J. M., Pelgrum H., Davids G., Thoreson B. P., Allen R. G., SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions, *J. Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, Vol. 131, No. 1, pp. 85–93.
14. Bezerra B. G., Silva B. B., Santos C. A. C., Bezerra J. R. C., Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: comparison of SEBAL and SSEB approaches, *Advanced Remote Sensing*, 2015, Vol. 4, No. 3, pp. 234–247.
15. Feddes R. A., Crop factors in relation to Makking reference crop evapotranspiration, *Technical Bull. Inst. for Land and Water Management Research*, 1987, No. 39, pp. 33–45.
16. Gowda P. H., Chavez J. L., Colaizzi P. D., Evette S. R., Howell T. A., Tolk J. A., ET mapping for agricultural water management: present status and challenges, *Irrigation Science*, 2008, Vol. 26, pp. 223–237.
17. Hongjun L., Jiazhen L., Yanjun S., Xiyang Z., Yuping L., Web-based irrigation decision support system with limited inputs for farmers, *Agricultural Water Management*, 2018, Vol. 210(C), pp. 279–285.
18. Kroes J. G., Van Dam J. C., Bartholomeus R. P., *SWAP version 4. Theory description and user manual*, Wageningen Environmental Research, Report 2780, 2017, 285 p.
19. Mannini P., Genovesi R., Letterio T., IRRINET: Large Scale DSS Application for On-farm Irrigation Scheduling, *Procedia Environmental Sciences*, 2013, Vol. 19, pp. 823–829.
20. Muzylev E. L., Zeyliger A. M., Startseva Z. P., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Ermolaeva O. S., Modeling Processes of Water and Heat Regime Formation for Agricultural Region Area (Russia) Utilizing Satellite Data, In: *Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources*, Proc. 1st Springer Conf. Arabian J. Geosciences (CAJG-1), Tunisia, 2018, pp. 37–39.
21. Overgaard J., Rosbjerg J. D., Butts M. B., Land-Surface Modeling in Hydrological Perspective — a Review, *Biogeosciences*, 2006, Vol. 3, pp. 229–241.
22. Su Z., The Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent Heat Fluxes, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, No. 6, pp. 85–100.
23. Wenchao W., Yuanlai C., Yufeng L., Zenghuan L., Junwei T., Web-based decision support system for canal irrigation management, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, available at: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.018>.
24. Yanfei M., Shaomin L., Lisheng S., Ziwei X., Yaling L., Tongren X., Zhongli Z., Estimation of daily evapotranspiration and irrigation water efficiency at a Landsat-like scale for an arid irrigation area using multi-source remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 216, pp. 715–734.
25. Yoder R. E., Odhiambo L. O., Wright W. C., Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States, *Applied Engineering in Agriculture*, 2005, Vol. 21, pp. 197–202.

26. Zeiliger A.M., A Hierarchical System to Model the Pore Structure of Soils: Indirect Methods for Evaluating the Hydraulic Properties, *Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, Proc., M. Th. van Genuchten, F.J. Leij, L.J. Lund (eds.), Riverside, University of California, 1992, pp. 499–514.
27. Zeiliger A.M., Pachepsky Ya.A., Rawls W.J., Estimating water retention of sandy soils using the additivity hypothesis, *Soil Sciences*, 2000, Vol. 165, No. 5, pp. 373–383.