



Формирование паттерн потоков суммарного испарения, влажности поверхностного слоя почвенного покрова и NDVI в 2022 г. при орошении посева сои дождевальными машинами Каскад (УНПО «Поволжье», Энгельский район Саратовской области)

Зейлигер А.М.^{1,2}, Ермолаева О.С.³, Доброхотов А.В.⁴, Затицацкий С.В.⁵ Колганов Д.А.⁵

¹ Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, 4, Россия

² ООО «ИНТУИТ-ГЕО», Москва, Россия

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

⁴ Федеральный научный центр – Агрофизический институт, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14

⁵ Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, Саратов, пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3

XXI Конференция ИКИ, 13-17.11.2023 г., Москва

ВВЕДЕНИЕ

- Хорошо известно, что для получения высоких и стабильных урожаев на орошаемых агроценозах необходимо обеспечить соответствие между их потребностями в воде с наличием соответствующих влагозапасов корнеобитаемого слоя на протяжении основных вегетационных фаз [1]. Соответствующая реализация этого требования связана с необходимостью учета пространственной вариации указанных потребностей, зависящих от характеристик растительного и почвенного покровов конкретного агроценоза.
- Значительная часть этих характеристик изменяется в течении вегетации под воздействием метеорологических факторов и условий, а также применяемых агротехнологических. В связи с этим в рамках парадигмы точного земледелия для обеспечения соответствия между потребностями в воде и ее наличием в ризосфере необходимы соответствующие методы и инструменты мониторинга для их пространственной оценки на уровне отдельного агроценоза [2].

Технологии Дистанционного и Проксимального Зондирования, а также Агрогидрологического Моделирования (1)

- В настоящее время технологии дистанционного и проксимального зондирования (Д и ПЗ), а также агрогидрологического моделирования (АМ) широко применяются в инновационных проектах по орошаемому земледелию, как для управления поливным режимом агроценозов [3], так и апостериорной оценки его эффективности [4]. Современные подходы в агрогидрологическом описании процессов в континууме почва-вода-растение-атмосфера (SWAP), включающие испарение с поверхности почвенного покрова, транспирацию растительного покрова, отбор воды из ризосферы и др. используют результаты количественной интерпретации результатов Д и ПЗ. Эти результаты используются для формирования граничных условий на дневной поверхности, а также калибрования характеристик водного стресса посевов сельскохозяйственных культур.
- Такие модели используются в методах мониторинга потребностей и текущих влагозапасов ризосферы. В свою очередь эти результаты используются для моделирования формирования вегетативной массы и конечной урожайности агроценоза и/или его отдельных контуров, оптимизированной с учетом экономической и экологической целесообразности (эффективности). Для этого используются варианты формирования водного режима ризосферы в зависимости от назначаемого поливного режима (сроков и норм поливов).

Паттерны орошаемого агроценоза

- Формирование на экстенде орошаемого агроценоза контуров с разными потребностями в воде, а также контуров с разным поливным режимом идентифицируется по наличию паттерн характеристик растительного и почвенного покрова, рассчитываемых по результатам ДиПЗ. Зачастую местоположение этих паттерн связано с характеристиками рельефа, а в ряде случаев с техническими особенностями дождевальных машин [5], а также с качеством выполнения технических предписаний по реализации, как отдельных поливов, так и всей их совокупности [6].

Что представлено, а также что было использовано?

- В настоящей работе представлены результаты анализа: а) поливного режима, реализованного в 2022 г. дождевальными машинами Каскад на посевах сои; б) влияния реализованного поливного режима на формирование паттернов ряда характеристик, контролируемых посредством Д и ПЗ.
- Для этого были использованы сформированные слои:
 - 1) объективных данных контроля реализации поливов;
 - 2) наборов метеорологических параметров;
 - 3) оценок объемной влажности поверхностного слоя почвенного покрова (Θ) по данным ПЗ (влажномер ML3-KIT (THETAKIT));
 - 4) оценок потоков суммарного испарения (E_{Ta}) по модели METRIC по данным ДЗ (TIR, Landsat 7,8);
 - 5) оценок Θ по данным ДЗ (Sentinel 1, SWIR, Sentinel 2); 6) оценок NDVI по данным ДЗ (LandSat 7,8 и Sentinel 2); 7) результатов АМ с использованием агрогидрологической модели AquaCrop.

ОБЪЕКТ (1)

- Территория, где проводились исследования, расположена 3-ей террасе левого берега р. Волги, в зоне сухих степей Заволжья с континентальным климатом и каштановыми почвами, вблизи административной границы Энгельского и Советского районов Саратовской области. Объект, на котором были проведены исследования, представлял собой посев сои 2022 г. (39,1 га) УНПО «Поволжье» Вавиловского университета (Энгельский район, Саратовская область).



ОБЪЕКТ (2)

- Орошение этого посева было реализовано ДМ «Каскад» кругового действия, состоящей из 6-ти тележек длиной порядка 50 м каждая, а также навесной фермой и концевой пушкой, которые обеспечивала полив контура с радиусом порядка 320 м. В оросительный период 2022 г. этой ДМ на посевах сои было проведено 8-ь поливов оросительной нормой порядка 160 мм.



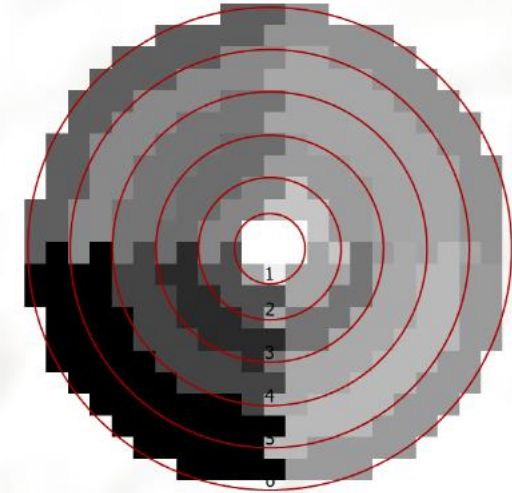
МЕТОД

- Для анализа реализованного водного режима агроценоза был сформирован набор данных ДиПЗ, а также результатов АМ включающий:
 - 1) набор объективных данных реализации поливов, полученных в результате обработки геоданных трекеров, установленных на ДМ «Каскад» и загруженных с веб-сервиса ООО «Агросигнал» [<https://agsh.agrosignal.com/>];
 - 2) набор метеорологических параметров полученных с локальной агрометеостанции «Сокол-М», которые были использованы в модели METRIC для расчетов ET_a;
 - 3) картограмму, сформированная по результатам ПЗ влажности поверхностного слоя почвенного покрова, реализованного с использованием ручного влагомера ML3-KIT (THEKIT) и видеофиксации его показаний, а также координат мест измерений посредством свободно распространяемого мобильного приложения GPS Map Camera [5];
 - 4) разновременные картограммы, сформированные по результатам ДЗ: а) потоков ET_a, рассчитанных по модели METRIC по данным теплового инфракрасного канала (TIR) Landsat 7, 8;
 - 5) Θ, рассчитанных по данным радиолокационного канала Sentinel 1 [6], а также средневолнового инфракрасного канала (SWIR) LandSat 7,8 и Sentinel 2;
 - 6) NDVI, рассчитанных по данным красного (R) и ближнего инфракрасного (NIR) каналов LandSat 7,8, а также Sentinel 2;
 - 7) наборы результатов АМ с использованием модели AquaCrop.

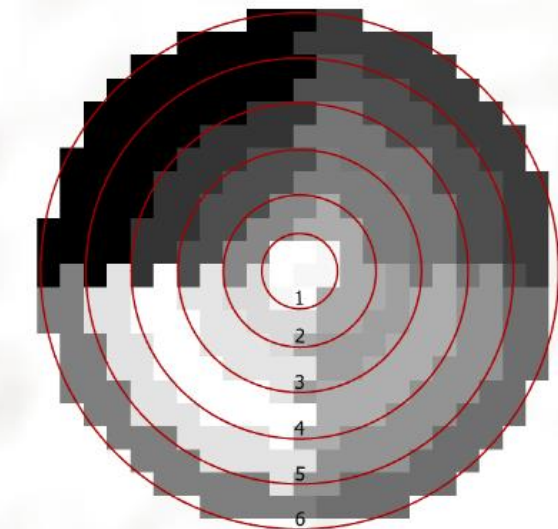
РЕЗУЛЬТАТЫ (1)

- Проведенный в среде ArcGIS Pro 2.7 пространственный анализ, сопряженных по времени картограмм ЕТа, Θ и NDVI исследованного посева сои, позволил выявить сопряженность во времени паттерн первых двух характеристик, а также отличия в сопряжении по времени этих паттерн от паттерн третьей характеристики. В первом случае были выявленные паттерны картограмм ЕТа и Θ , имевшие две достаточно строгие геометрические формы.
- Первая из этих форм состояла из 4-х секторов с практически прямым углом (порядка 90°) в месте расположения центральной опоры ДМ. Примечательно, что эта форма паттерна прослеживались в течении практически всего вегетационного периода.
- Вторая из этих форм состояла из концентрических колец, заключенных между колеями, сформированными 6-ю опорами, а также внешней границей дождевания.
- Отметим, что паттерны Θ обоих видов паттерны, полученные, как с использованием результатов радиолокационной съемки Sentinel-1 [5], так и с использованием SWIR съемки Sentinel-2, были схожи.

ЕТа, 09.08.2022



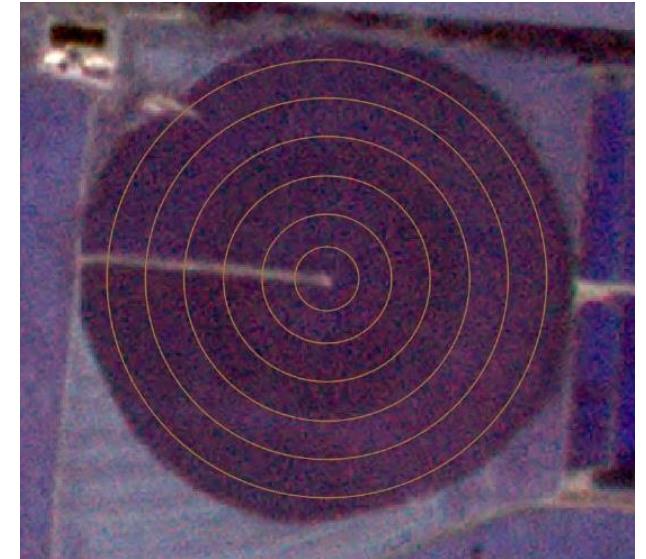
ЕТа, 16.08.2022



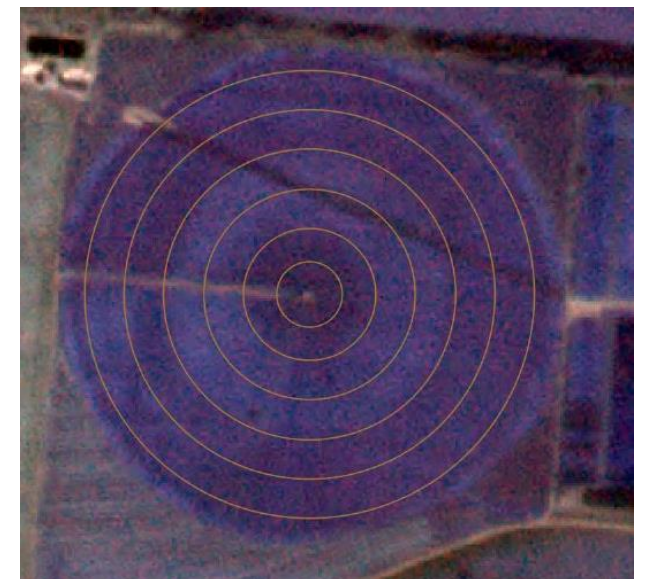
NDVI, 01.08.2022

РЕЗУЛЬТАТЫ (2)

- В случае третьей характеристики NDVI, то на ее картограммах, построенных по результатам съемок до начала фазы налива семян (первая декада августа 2022 г.), не были идентифицированы сколь-нибудь значимые паттерны, имевшие отмеченные геометрические формы. В тоже самое время на картограммах, построенных по результатам съемок, проведенных уже после начала фазы налива семян сои, вплоть до уборки урожая, были идентифицированы паттерны, второго вида – концентрических колец. В дополнение к этим паттернам на картограммах, построенных после начала фазы налива семян сои был идентифицирован паттерн, имевший форму сектора с острым углом (порядка 30°), который был расположен в конце последнего 4-го сектора (с прямым углом) по ходу поворота ДМ при ее штатной работе.

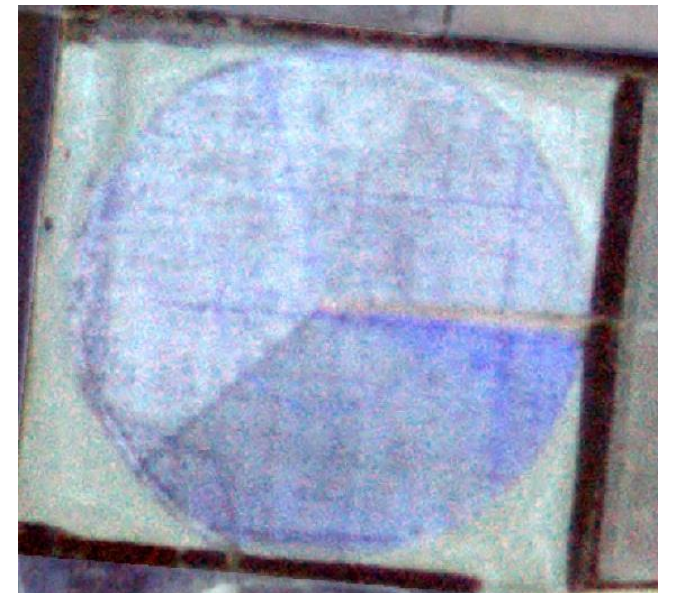
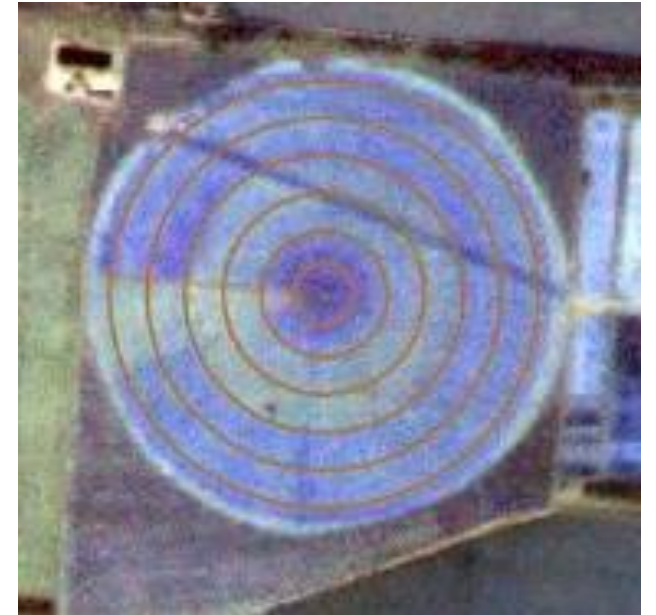


NDVI, 15.08.2022



ОБСУЖДЕНИЕ (1)

- Для верификации результатов анализа картограмм, в ходе которого были идентифицированы систематически повторяющиеся паттерны трех типов (секторальные с углом порядка 90° и углом порядка 30° , а также концентрических колец) было проведено АМ с использованием модели AquaCrop. При этом для случая секторальных паттерн даты начала всех 8-и реализованных в течении оросительного периода поливов были последовательно смещены на сутки между соседними секторами в соответствии с фактическим проведением поливов, верифицированных по данными объективного контроля. Таким образом было проведено АМ поливного режима, который осуществлялся в светлое время суток с 7:00 до 19:00 местного времени, за которое посредством ДМ Каскад осуществлялся полив соответствующего сектора в результате своего поворота на 90° .



ОБСУЖДЕНИЕ (2)

- Анализ совокупности результатов АМ в части оценки потоков ЕТа полученных с использованием модели AquaCrop, и их сопоставления с потоками ЕТа полученными с использованием модели METRIC по TIR каналу КА Landsat 7, 8, позволил верифицировать формирование секторальных паттерн в результате реализации 8ми поливов, каждый из которых последовательно приходился на 4е смежных сектора. При этом было отмечено, что на протяжении всего исследованного оросительного периода объемы воды, формируемые потоками ЕТа, согласно модели AquaCrop, были на 20-25% больше, аналогичных потоков, полученных по модели METRIC по данным ДЗ. Это позволило прийти к выводу о формировании в результате дождевания грунтового стока поливной воды за нижний предел ризосферы, что приводило к недоступности соответствующей части поливной воды для корневой системы посева сои. В целом отмеченный вывод соответствовал результатам анализа экспериментальных данных ранее проведенного в этом региона на аналогичных почвах 3-х летнего мониторинга с послойным мониторингом влажности почвенного профиля с использованием измерительного оборудования Trime FM [7].

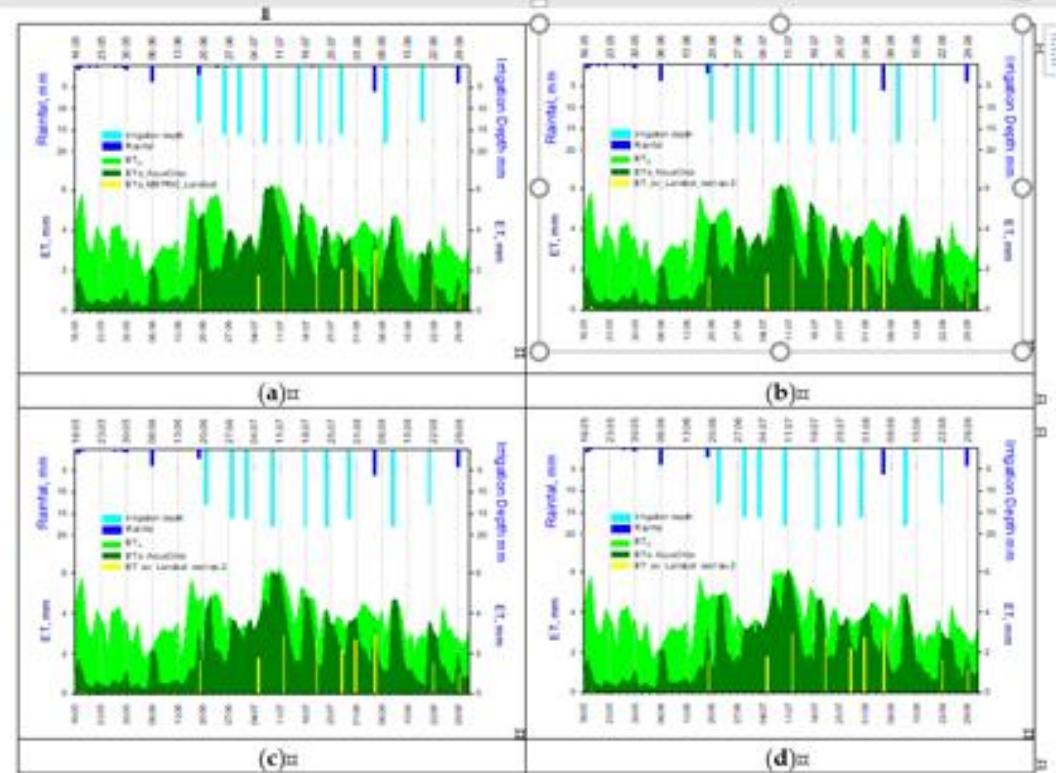
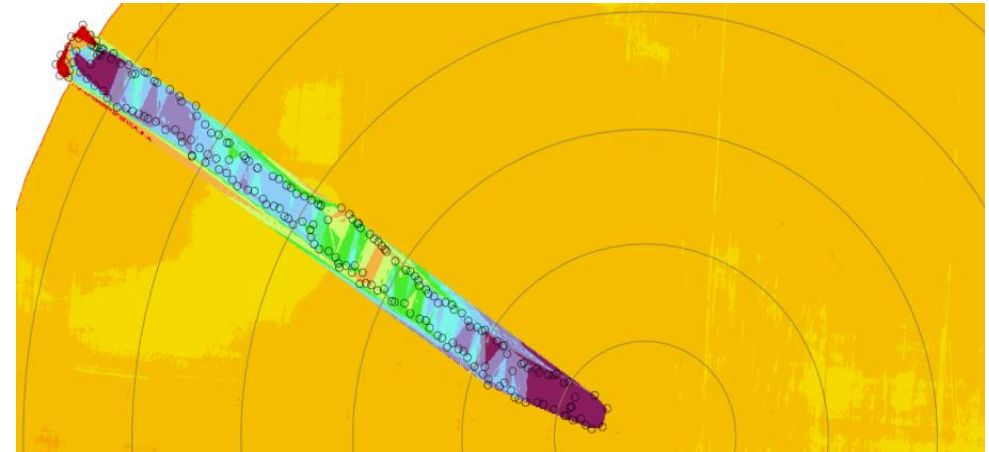


Figure 6. Rainfall, irrigation rates, as well as ET_A Landsat-METRIC and ET_A AquaCrop flows of irrigated soybean crops: 1st sector (a); 2nd sector (b); 3rd sector (c); 4th sector (d).

ОБСУЖДЕНИЕ (3)

- В случае паттерн, имевших форму концентрических колец были использованы результаты ПЗ Θ поверхностного слоя почвенного покрова вдоль дождевого фронта, который был проведен с использованием ручного влагомера ML3-KIT (ТНЕТАКИТ) и видеофиксации его показаний, а также координат мест измерений, посредством свободно распространяемого мобильного приложения GPS Map Camera. Полученные результаты позволили выявить значимое отличие локальных поливных норм (в пределах 2-2,5) вдоль дождевого фронта ДМ Каскад [5]. Выявленное отличие, согласно результатам проведенной технической проверки 86-ти установленных на ДМ «Каскад» разбрызгивателей, было связано с рядом несоответствий их характеристик установленному регламенту. Значения рассчитанных локальных поливных были использованы в АМ с использованием модели AquaCrop для верификации формирования паттерн, имевших форму концентрических колец. Результаты проведенного АМ подтвердили выявленные особенности, нашедшие свое отражение в рассчитанных значениях ЕТа.



ОБСУЖДЕНИЕ (4)

- В свою очередь, на картограммах NDVI, соответствовавших стадиям вегетации от начальной до момента налива семян сои, не было выявлено сколь значимых паттерн, в том числе и паттерн идентифицированных на картограммах ЕТа и Θ. Однако, на картограммах, соответствующих стадиям налива и последующих, были также идентифицированы паттерны, имевшие форму концентрических колец. Проведенный полевой анализ растений сои в пределах этих колец показал, что их формирование связано с разным наступлением фазы налива семян, которое началось раньше на конурах в границах колец с меньшими локальными нормами. Очевидно, что этот феномен проявился в результате поливного режима с меньшими поливными нормами, вызвавшими более высокий водный стресс сои, в сравнении с другими контурами с более высокими поливными нормами и соответственно менее значимым водным стрессом. В итоге это привело к сокращению предшествующей фазе налива фазы формирования бобов, что нашло свое отражение в идентифицированных паттернах на картограммах NDVI.

ОБСУЖДЕНИЕ (5)

- Аналогичные результаты анализ были получены и для идентифицированного сектора с острым углом. По результатам проверки с использованием данных объективного контроля было выявлено нарушение технологического режима, в результате которого на этом секторе не было выполнен ряд поливов. Соответствующие последствия оказались идентичным выше описанным.

ОБСУЖДЕНИЕ (5)

- Попытки верификации идентифицированного случая формирования кольцеобразных паттерн в результате уменьшения поливных норм с использованием модели AquaCrop не привели к получению адекватных результатов. Основная причина этого заключалась в задании начала каждой фазы вегетации в соответствии с эмпирическим данным, или продолжительности предыдущих фаз, или по сумме накопленных суточных температур воздуха, без связи или с состоянием водного стресса или с водным режимом ризосферы.

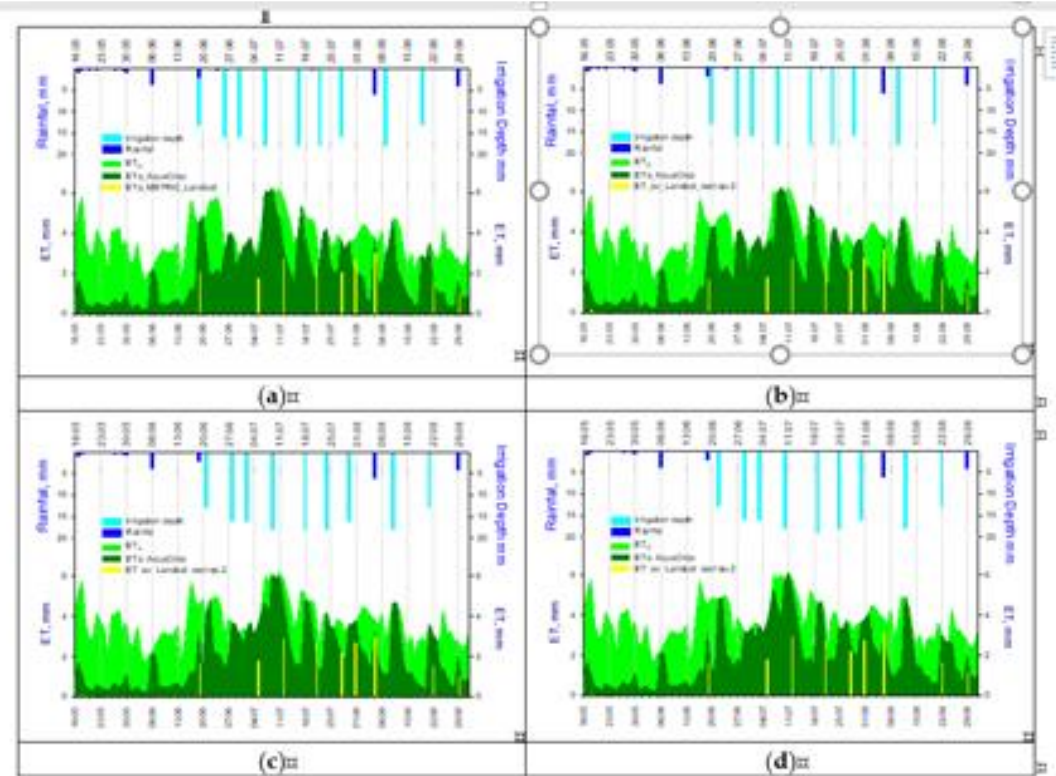


Figure 6. Rainfall, irrigation rates, as well as ET_A Landsat-METRIC and ET_A AquaCrop flows of irrigated soybean crops: 1st sector (a); 2nd sector (b); 3rd sector (c); 4th sector (d). ¶

ВЫВОДЫ

- 1) Результаты анализа и сопоставления характерных особенностей наборов картограмм ET_a и Θ позволили прийти к выводу о значимой чувствительности соответствующих характеристик водного режима агроценозов: 1) к реализации отдельных поливов в течении всего оросительного периода, которые были реализованы в соответствии с техническими предписаниями, а также рядом отклонений от них; 2) к техническим особенностям функционирования разбрызгивателей, установленных на напорном фронте ДМ Каскад.
- 2) Результаты анализа наборов картограмм NDVI позволил выявить связь моментов времени формирования концентрических паттерн, кольцеобразной формы, с моментами времени наступления фазы налива семян сои. Это позволило прийти к выводу о значимости выявленной особенности этой характеристики для диагностирования наступления фазы налива в задачах, связанных с водным режимом и его влияния на рост и развитие агроценозов.
- 3) Результаты АМ с использованием модели AquaCrop и их сопоставления с результатами анализа наборов картограмм ET_a , Θ и NDVI, позволили выявить два важных научно-методических аспекта применения этой модели для анализа режимов орошения посевов сои на каштановых почвах, которые нуждаются в дальнейшем совершенствовании. Первый из них касается описания формирования при орошении орошения грунтового стока за пределы нижней границы ризосферы. Второй – отсутствия связи между водным режимом и/или сформированным режимом водного стресса посева сои и моментом наступления фазы налива семян сои.

Библиографические источники

1. Zhang, J.; Guan, K.; Peng, B.; Pan, M.; Zhou, W.; Jiang, C.; Kimm, H.; Franz, T.E.; Grant, R.F.; Yang, Y.; et al. Sustainable irrigation based on co-regulation of soil water supply and atmospheric evaporative demand. *Nat. Commun.* 2021, 12, 5549
2. Neupane, J.; Guo, W. Agronomic Basis and Strategies for Precision Water Management: A Review. *Agronomy* 2019, 9, 87.
3. Zeyliger, A. M. Water stress regime of irrigated crops based on remote sensing and ground-based data / A. M. Zeyliger, O. S. Ermolaeva // *Agronomy*. – 2021. – Vol. 11, No. 6. – DOI 10.3390/agronomy11061117.
4. Zeyliger, A. M. Assessment of Irrigation Efficiency by Coupling Remote Sensing and Ground-Based Data: Case Study of Sprinkler Irrigation of Alfalfa in the Saratovskoye Zavolgie Region of Russia / A. M. Zeyliger, O. S. Ermolaeva, V. V. Pchelkin // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, No. 5. – P. 2601.
5. Зейлигер, А. М. Анализ пространственного варьирования влажности почвенного покрова вдоль фронта дождевальнoй машины / А. М. Зейлигер, С. В. Затицацкий, О. С. Ермолаева, Д. А. Колганов // *Природообустройство*. – 2023. – № 3. – С. 15-22. – DOI 10.26897/1997-6011-2023-3-15-22.
6. Метод мониторинга влажности почвы, покрытой растительным покровом, с использованием нейронной сети, радарных и мультиспектральных оптических данных Sentinel-1,2 / А. М. Зейлигер, К. В. Музалевский, Е. В. Зинченко, О. С. Ермолаева // *Журнал радиоэлектроники*. – 2023. – № 1. – DOI 10.30898/1684-1719.2023.1.8.
7. Исследование предпочтительных потоков влаги в лугово-черноземной почве Саратовского Заволжья / С. В. Затицацкий, А. М. Зейлигер, А. К. Губер [и др.] // *Почвоведение*. – 2007. – № 5. – С. 585-598.