

## Сегментирование потока суточного суммарного испарения орошаемого производственного посева сои по модели METRIC и данным Landsat-8

А. М. Зейлигер<sup>1,4</sup>, А. В. Доброхотов<sup>2</sup>, О. С. Ермолаева<sup>3</sup>, Я. С. Котов<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup> *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия*  
E-mail: azeiliger@mail.ru

<sup>2</sup> *Агрофизический научно-исследовательский институт*  
Санкт-Петербург, 195220, Россия  
E-mail: dobralexey@gmail.com

<sup>3</sup> *Российский государственный аграрный университет —*  
МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, 127434, Россия  
E-mail: ol\_ermolaeva@mail.ru

<sup>4</sup> *Саратовский государственный университет генетики, биотехнологий*  
и инженерии имени Н. И. Вавилова, Саратов, 410012, Россия  
E-mail: dmi.kolg@mail.ru

<sup>5</sup> *Московский физико-технический институт (НИУ)*  
Долгопрудный, Московская обл., 141700, Россия  
E-mail: kotov.ias@phystech.edu

Методы сегментации орошаемых агроценозов на зоны управления с использованием данных дистанционного зондирования Земли лежат в основе перевода результатов исследований в практику точного орошаемого земледелия. Одним из параметров, используемых для сегментации, является поток суммарного испарения, характеристики которого тесно связаны с наличием в корнеобитаемом слое почвенного покрова запасов влаги, доступной для сельскохозяйственных растений. В представленной работе приведены результаты анализа сегментации потоков суточного суммарного испарения с поверхности производственного орошаемого посева сои в вегетационный период 2021 г. по трём видам зон управления дождевальной машины кругового действия (ДМ-КД) марки «Каскад» (УНПО «Поволжье» Вавиловского университета, Энгельский район, Саратовская область). Для этих целей использован трёхмерный геодатасет, включающий девять разновременных слоёв актуального суточного потока суммарного испарения ( $ET_{24}$ ), рассчитанных по модели METRIC с применением девяти безоблачных сеансов съёмки космическим аппаратом Landsat-8, а также данных наземного мониторинга погодных условий. На первом этапе пространственного анализа слоёв  $ET_{24}$  были использованы методы: 1) интерполяции с обратными взвешенными расстояниями; 2) кластеризации с использованием локального индекса Морана; 3) визуализации нормированных значений градуированными символами. По результатам сопоставления геопаттернов, идентифицированных на рассчитанных картограммах  $ET_{24}$ , с поливным режимом были высказаны предположения об их техногенном происхождении. Соответствующее тестирование  $ET_{24}$  проведено по трём видам зон управления ДМ-КД «Каскад»: 1) секторальным; 2) кольцеобразным; 3) круговых сегментов. Необходимая для этого разметка слоёв геодатасета была реализована с использованием шейп-файлов, рассчитанных по геометрическим характеристикам этой ДМ-КД. Для размеченных поднаборов данных слоёв  $ET_{24}$  рассчитаны статистические характеристики мер центральной тенденции и рассеяния. Анализ их результатов позволил выявить наличие пространственных и временных связей как между слоями, так и между отдельными зонами. При этом было выявлено наличие устойчивого уменьшения медианных значений сегментированного потока  $ET_{24}$  в направлении от центра вращения ДМ-КД к периферии сформированного кругового контура орошаемого посева сои. Эта тенденция вызвана снижением поливных норм в том же направлении от центра к периферии напорного фронта ДМ-КД с разбрызгивателями, не оснащёнными регуляторами давления. Таким образом, результаты исследования, полученные с использованием разработанного метода сегментирования потока  $ET_{24}$ , позволили подтвердить предположение о техногенном происхождении идентифицированных геопаттернов, а также установить связь статистических характеристик зонального распределения этого потока с техническими характеристиками ДМ-КД «Каскад» и реализованным поливным режимом.

**Ключевые слова:** точное орошаемое земледелие, орошаемый агроценоз, дождевальная машина кругового действия, зоны управления, поток суммарного испарения, техногенные паттерны, модель METRIC, данные Landsat-8, сегментирование изображения, тест Краскела – Уоллеса

Одобрена к печати: 10.02.2025  
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-99-119

## Введение

Пресные воды, используемые в аграрном секторе и, в частности, в орошаемом земледелии, относятся к основным жизненно важным ресурсам (Water..., 2017). Нарастающий дефицит этих ресурсов в районах с аридным климатом вынуждает вести непрерывное совершенствование технологий в основных водопотребляющих отраслях. Самой водозатратной из этих отраслей является орошаемое земледелие, на долю которого приходится порядка 70 % от общемирового забора пресных вод (Water..., 2017). Однако неэффективное использование воды, забираемой для орошения, влечёт за собой не только её дефицит, но и увеличение нагрузки на окружающую среду в виде деградации земельных и водных ресурсов. Это, в свою очередь, приводит не только к уменьшению урожайности сельскохозяйственных культур, но и к снижению качества экологических сервисов (Ермолаева, Зейлигер, 2021). В ряду применяемых методов и технологий орошения наиболее водозатратными являются методы поверхностного орошения с потерями порядка 40–60 % от поливной нормы. За ними следуют методы искусственного дождевания с потерями около 10–30 %, а затем — методы микроорошения с потерями примерно 5–15 % (Irmak et al., 2011). При этом из практики орошения известно, что конкретному агроценозу свойственна высокая индивидуальность реакции на орошение, которая, с одной стороны, связана с пространственными характеристиками растительного и почвенного покрова, а с другой — с реализацией поливов (Ермолаева, Зейлигер, 2023; Зейлигер, Ермолаева, 2016а). Одним из примеров являются результаты исследований эффективности орошения (водоэффективности) посевов люцерны в Саратовском Заволжье с использованием данных наземного и космического мониторинга. Эти исследования выявили варьирование водоэффективности в пределах от 30 до 70 % (Ермолаева, Зейлигер, 2023; Зейлигер и др., 2019; Zeyliger et al., 2023).

Обобщение практики ведения орошаемого земледелия привело к формулированию методологии высокоэффективного орошения «конкретного» агроценоза на основе принципа взаимосвязи трёх конкретных составляющих (далее — «трёх конкретик»): 1) конкретное место; 2) конкретное время; 3) конкретный (точный) объём поливной воды (Morillo et al., 2015). По своей сути эта методология является расширением парадигмы точного орошаемого земледелия, основанной на сочетании четырёх цифровых технологий: а) геоинформационных систем; б) дистанционного и проксимального зондирования; в) глобальных навигационных спутниковых систем; г) искусственного интеллекта (Зейлигер, Ермолаева, 2016а). Проведённые полевые исследования технологии полива с пространственным дифференцированием норм по зонам управления (Зейлигер, 2010; Зейлигер, Ермолаева, 2016б; Якушев, Якушев, 2007; Fontanet et al., 2020; Gonzalez-Dugo et al., 2014; Smith et al., 2010) показали её преимущество в сравнении с традиционной унимодальной (одинаковой на всём пространстве посева) поливной нормой.

Для дифференциации пространства орошаемого агроценоза на зоны управления используются сети стационарных датчиков, местоположение которых определяется по результатам: а) почвенных обследований (Bazzi et al., 2018; Cheng et al., 2019); б) геофизической съёмки (De Lara et al., 2018; Han et al., 2020; Song et al., 2016); в) дистанционного зондирования (Ortuani et al., 2019; Rojo et al., 2016; Serrano et al., 2020; Vera et al., 2019). При этом для выделения зон управления применяются методы пространственной кластеризации по одному параметру (Han et al., 2020; Ohana-Levi et al., 2019; Oldoni, Bassoi, 2016), а также комбинации параметров космического мониторинга в оптическом VIS (*англ.* visible), ближнем инфракрасном NIR (*англ.* near-infrared) и тепловом инфракрасном TIR (*англ.* thermal infrared) диапазонах

(Javadi et al., 2022). Приведённое в работах (Fontanet et al., 2020; Scudiero et al., 2018) сопоставление результатов сегментации картограмм смежных сеансов дистанционного зондирования привело к выводу о наличии динамичного характера зон управления, что во многом связано с применяемым поливным режимом. В то же время в исследованиях (Зейлигер и др., 2023; Zeyliger et al., 2024) было выявлено значимое влияние гидравлических характеристик напорного фронта дождевальной машины кругового действия (ДМ-КД) на формирование круговых геопаттернов влажности почвенного покрова (ПП) орошаемого агроценоза. В этой связи цель настоящей работы заключалась в разработке методики сегментирования потока суточного актуального суммарного испарения  $ET_{24}$  (англ. EvapoTranspiration, эвапотранспирация), рассчитанного по модели METRIC с использованием данных космического аппарата (КА) Landsat-8 и наземного метеорологического мониторинга, на примере производственного посева сои.

### Объект исследований

Объектом исследования стали пространственно-временные характеристики потока  $ET_{24}$ , сформированного производственным посевом сои сорта Соер-7 площадью 39,1 га (рис. 1а) в вегетационный период 2021 г. Орошение этого посева было реализовано в УНПО «Поволжье» Вавиловского университета (Энгельский район, Саратовская область) посредством ДМ-КД марки «Каскад» (см. рис. 1б).

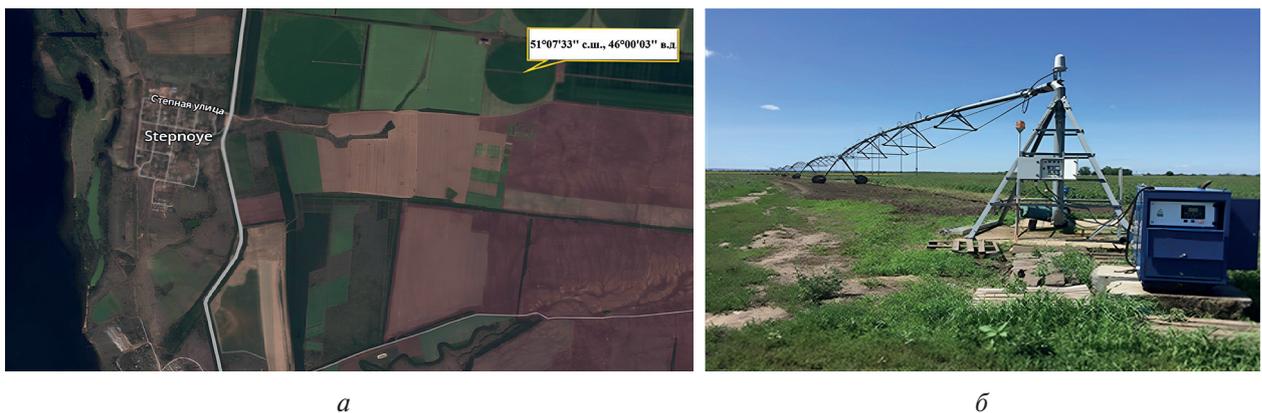


Рис. 1. Изображения: а — местоположение посева орошаемой сои (Google Earth); б — центральная опора ДМ-КД «Каскад» (51°07'33" с. ш., 46°00'03" в. д.), а также её фермы, тележки и колёсные пары, расположенные вдоль технической дороги

Местоположение посева — третья надпойменная терраса левого берега нижнего течения реки Волги, приуроченная к зоне сухих степей с континентальным климатом и автоморфными каштановыми почвами. Эти почвы имеют в основном среднесуглинистый механический состав с гумусным горизонтом мощностью от 50 до 70 см, содержащим порядка 1,5–2 % органического вещества. Годовая продолжительность безморозного периода составляет 150–160 дней, а сумма активной температуры за вегетационный период достигает порядка 2600–2800 °С, что позволяет выращивать широкий спектр сельскохозяйственных культур. Однако невысокое количество осадков, составляющее 350–450 мм в год, большая часть которых выпадает зимой и весной, а также частые и продолжительные засухи делают неорошаемое земледелие в этом регионе рискованным. Для орошения посева сои 2021 г. было проведено девять поливов (табл. 1), два из которых — поливными нормами 13–14 мм, реализованными за три рабочих дня (с 07:00 до 19:00), а остальные семь — нормами 16–18 мм — за четыре.

Таблица 1. Даты и нормы поливов посева сои сорта Соер-7, 2021 г.

№ полива	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дата полива	19.06– 21.06	26.06– 28.06	30.06– 02.07	07.07– 10.07	15.07– 18.07	22.07– 25.07	29.07– 31.07	04.08– 07.08	20.08– 22.08
Поливная норма, мм	13	16	16	18	18	18	16	18	13

Использованная для орошения ДМ-КД «Каскад» (см. рис. 1б) представляет собой мобильную установку, состоящую из шести смежных тележек, опирающихся на колёсные пары. Вращение колёсных пар вокруг центральной опоры осуществляется электроприводом. Дождевой фронт формируется разбрызгивателями и концевой пушкой. Разбрызгиватели, размещённые на фермах (длина первой фермы — 48 м, пяти следующих — по 59,5 м), а также на консольной ферме (длина 22 м), прикрепленной к внешнему торцу шестой тележки, не оснащены регуляторами давления. Концевая пушка с радиусом разбрызгивания 15 м расположена на внешнем торце консольной фермы (Зейлигер и др., 2023). Эти характеристики ДМ-КД «Каскад» были использованы для создания в программном обеспечении (ПО) ArcGIS Pro v.3.0 цифровой модели зон управления. Созданная модель представляла собой круговой контур радиусом 332,5 м, разделённый на четыре секторальные зоны (СЗ) с центральными углами по 90°. Соответствующие СЗ имели порядковые номера 1, 2, 3 и 4 согласно очередности проведения поливов, которые осуществлялись по направлению часовой стрелки, начиная от технической дороги (рис. 2а). Для выделения семи кольцеобразных зон (КЗ) были использованы приведённые выше геометрические характеристики, соответствующие радиусам шести колеи тележек ДМ-КД «Каскад», пронумерованных 1, 2, 3, 4, 5 и 6 в порядке их чередования от центральной опоры, а также кольцеобразной зоны с номером 7, полив которой осуществлялся концевой пушкой (см. рис. 2б). Для выделения 28 зон кольцеобразных сегментов (ЗКС) было проведено разделение семи КЗ по границам четырёх СЗ (см. рис. 2в).

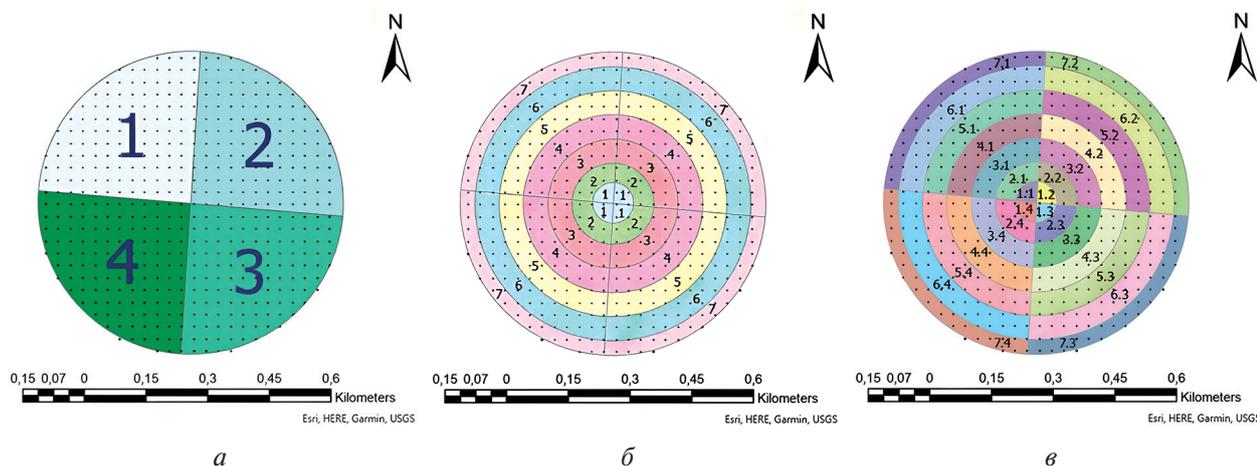


Рис. 2. Картографическое представление трёх видов зон управления ДМ-КД «Каскад», отображённых поверх подложки с центрами пикселей TIR-снимков КА Landsat-8: а — четырёх секторальных зон; б — семи кольцеобразных зон; в — 28 зон кольцеобразных сегментов

### Методика

Расчёт слоёв потоков  $ET_{24}$  был проведён по модели METRIC (англ. Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) (Allen et al., 2007a, b). Алгоритм этой модели основан на использовании данных: а) космической съёмки в тепловом и оптическом канале;

б) наземного метеорологического мониторинга приземного слоя атмосферы. Эта модель включает систему теоретических и эмпирических уравнений для экстраполяции мгновенной величины потока  $ETa$  на момент космосъёмки на суточный поток  $ET_{24}$  соответствующих суток. При этом мгновенный поток рассчитывается по потоку скрытого тепла  $LE$  как остаточному члену уравнения энергетического баланса, правая часть которого включает радиационный баланс растительной поверхности ( $R_n$ ), турбулентный поток тепла ( $H$ ) и поток тепла в почву ( $G$ ).

$$LE = R_n - H - G.$$

Выбор модели METRIC был обусловлен, во-первых, наличием в её алгоритме оценки эталонной эвапотранспирации ( $ETr$ ) по стандарту ASCE (*англ.* American Society of Civil Engineering) (Allen et al., 2005) и, во-вторых, большим числом успешных кейсов её валидации методами лизиметрических и пульсационных измерений на посевах орошаемых сельскохозяйственных культур в сходных климатических условиях (Allen et al., 2007b; Asadi et al., 2022; Cetin et al., 2023; Elkatoury et al., 2020; Jamshidi et al., 2019; Kamyab et al., 2022; Madugundu et al., 2017; Nisa et al., 2021; Ortega-Salazar et al., 2021; Poblete-Echeverría, Ortega-Farias, 2012; Reyes-González et al., 2019; Singh, Senay, 2016; Tawalbeh et al., 2024; Wang et al., 2019). Другим обстоятельством выбора послужило наличие в модели METRIC, в отличие от широко известной модели SEBAL (*англ.* Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen et al., 1998), алгоритма внутренней параметризации регрессионной характеристики, связывающей температуру земной поверхности с градиентом температуры приземного слоя атмосферы с использованием автоматической идентификации «горячих» и «холодных» пикселей раstra снимка температуры подстилающей поверхности (Allen et al., 2005).

### Наборы исходных данных модели METRIC

Для расчёта  $ET_{24}$  производственного посева сои по модели METRIC были использованы данные съёмки КА Landsat-8 в оптическом диапазоне (SRB2, 0,452–0,512 мкм; SRB3, 0,533–0,590 мкм; SRB4, 0,636–0,673 мкм; SRB5, 0,851–0,879 мкм; SRB6, 1,566–1,651 мкм) и дальнем инфракрасном диапазоне (STB10, 10,60–11,19 мкм) девяти безоблачных сцен (*табл.* 2). Соответствующие наборы данных с уровнем предварительной обработки Landsat-8 OLI/TIRS (*англ.* Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) — Level 2 Collection 2 (EPSG:32638 — WGS 84/UTM zone 38N), атмосферной коррекцией по LaSRC (*англ.* Land Surface Reflectance Code) и пространственным разрешением 30 м были получены на облачной платформе GEE (*англ.* Google Earth Engine).

Таблица 2. Даты и время съёмок Landsat-8 (2021)

№ съёмки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дата	18.05	19.06	05.07	12.07	21.07	28.07	06.08	22.08	29.08
Время, GMT+4	07:46:36	07:46:50	07:46:53	07:53:04	07:47:21	07:53:11	07:47:04	07:46:09	07:53:22

Метеорологические данные, использованные в расчётах суточных значений потенциального суммарного испарения  $ETr$  по стандартизированной зависимости ASCE (Allen et al., 2005) (*рис.* 3, см. с. 104) были получены на полевой метеостанции «Сокол-М» № 159, расположенной восточнее посева сои на расстоянии 4 км. Согласно этим метеоданным, условия вегетации были засушливыми: наблюдалось полуторамесячное отсутствие осадков и высокая температура. Рассчитанные по рядам суточных значений осадков и температуры воздуха значения гидротермического коэффициента увлажнения (ГТК) Селянинова (Селянинов, 1928) за три летних месяца (июнь – август) характеризовали условия вегетации каждого из них как требующие орошения (ГТК < 0,5).

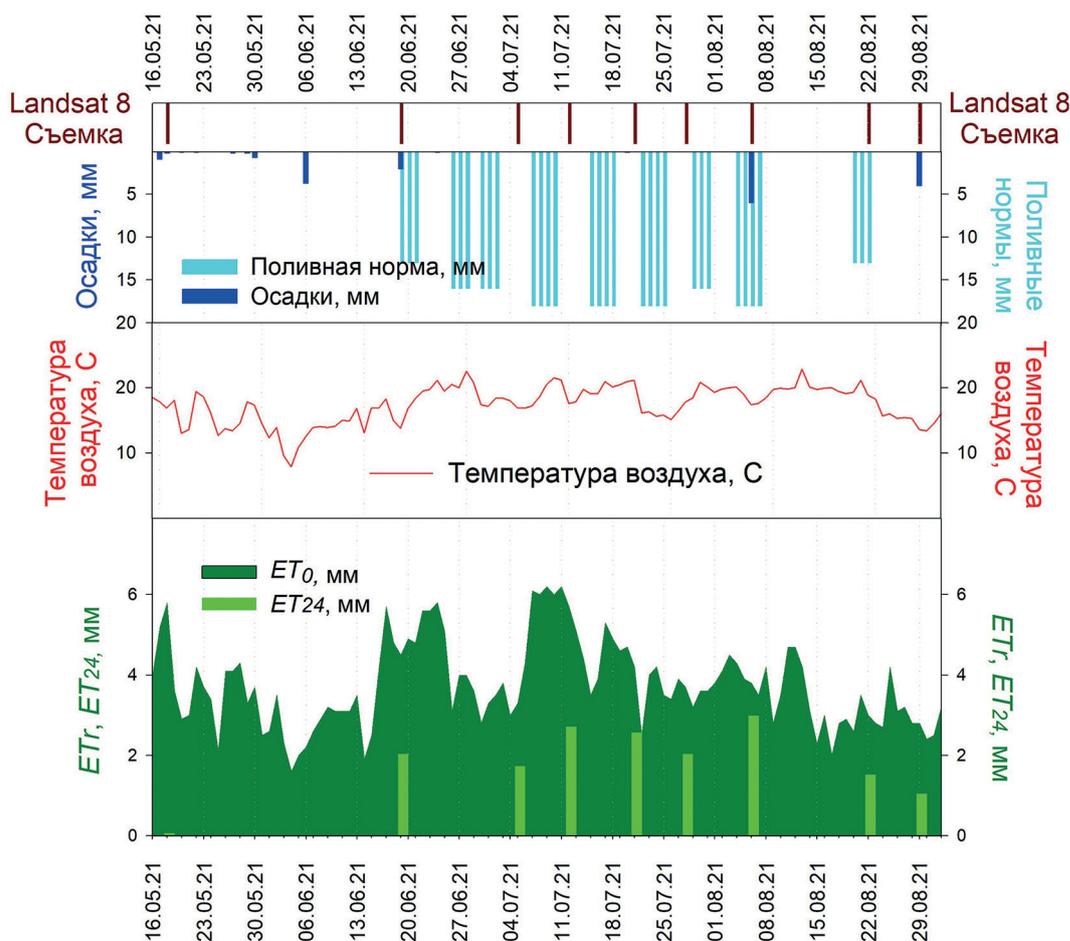


Рис. 3. Диаграмма временных рядов дат съёмок КА Landsat-8 и проведения поливов, суточных значений осадков, температуры приземного слоя атмосферы, потенциального суммарного испарения  $ET_0$ , а также среднего по пространству посева потока суточного актуального испарения  $ET_{24}$

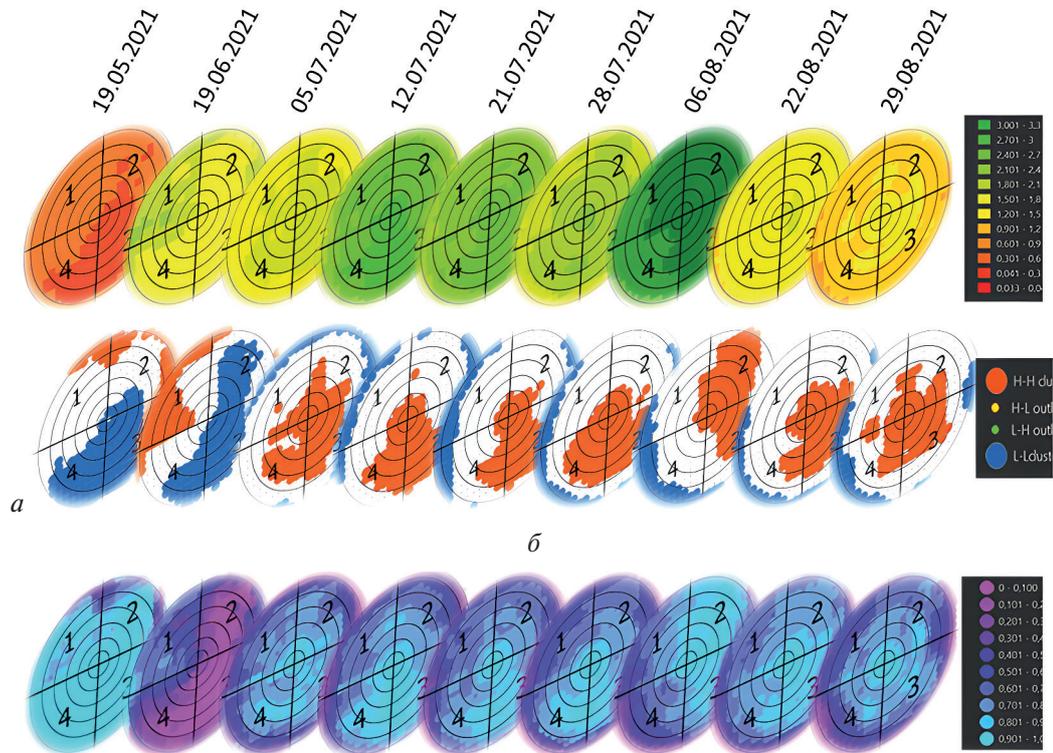
### Результаты и обсуждение

Для автоматизации расчётов растровых слоёв  $ET_{24}$  на языке программирования Python с применением библиотек PyGRASS и PyQGIS был составлен компьютерный код, реализующий для полных сцен снимков Landsat-8 площадью порядка  $170 \text{ км}^2$ : а) загрузку и предварительную обработку снимков и рядов метеорологических данных; б) нахождение холодного и горячего пикселя; в) расчёты по алгоритму модели METRIC в среде программирования R с использованием библиотеки Water (Olmedo et al., 2016); г) вырезание раstra по внешней границе исследованного посева с использованием инструмента Warp и библиотеки для работы с пространственными данными GDAL (англ. Geospatial Data Abstraction Library); д) формирование слоёв пространственных данных (далее геоданных) в ПО ArcGIS Pro 3.0. В результате было получено девять растровых слоёв  $ET_{24}$  с 488 пикселями. Для количественного анализа этих слоёв, а также идентификации межслоевых связей был сформирован пространственно-временной набор геоданных (далее геодатасет)  $\overline{ET_{24}}$ .

#### Временные ряды картограмм $ET_{24}$

На рис. 4 (см. с. 105) представлены три временных ряда девяти слоёв картограмм геодатасета  $\overline{ET_{24}}$ , отображения которых были получены в ПО ArcGIS Pro 3.0 в результате обработки с использованием: 1) детерминистической интерполяции набора геоданных (далее — геоин-

терполяция) методом IDW (*англ.* Inverse Distance Weighting); 2) кластеризации набора геоданных с использованием локального индекса ALMI (*англ.* Anselin Local Moran's Index); 3) визуализации набора геоданных (далее — геовизуализация) градуированными символами.



в Рис. 4. Наборы временных рядов картограмм девяти слоёв геодатасета  $\overline{ET}_{24}$ , полученных с использованием: а — детерминистической геоинтерполяции (IDW); б — геокластеризации (ALMI); в — геовизуализации градуированными символами

Для отображения картограмм 1-го ряда (IDW), каждая из которых представляет собой интерполяционную поверхность со значениями в местоположении исходных точек, равными заданным, была использована двухцветная палитра с 12 установленными интервалами (см. рис. 4а). Эта палитра была выбрана из большого числа рассмотренных и, по мнению авторов, оказалась наиболее удобной для отображения набора рассчитанных картограмм с относительно невысокой пространственной вариацией значений  $ET_{24}$ . На картограммах, отображённых для дат 19.05.2021, 19.06.2021 и 29.08.2021 с помощью этой палитры, визуализируются повторяющиеся текстуры, формирующие достаточно устойчивые во времени пространственные паттерны (далее — геопаттерны).

В свою очередь для геокластеризации был применён инструмент ALMI (Anselin, 1995). Этот инструмент, используемый для оценки автокорреляции между соседними пикселями (геообъектами), основан на оценке так называемого индекса локальной статистики Морана, положительные значения которого указывают на наличие у исследуемого геообъекта соседних, имеющих такие же высокие (H) или такие же низкие (L) значения атрибута. Отрицательные же величины этого индекса свидетельствуют о присутствии у исследуемого геообъекта соседних, обладающих значимо отличными значениями атрибута. Последующее объединение геообъектов в соответствии с задаваемым значением порога значимости (*p*-value) реализуется в три типа геокластеров: 1) H-H, имеющих высокие значения; 2) L-L, имеющих низкие значения; 3) H-L и L-H, имеющих разновеликие значения атрибутов.

Результаты геокластеризации девяти слоёв ( $p < 0,05$ ), отображённые на рис. 4б с использованием пятицветной палитры, свидетельствуют об их неслучайном характере. Ряд отображён-

ных геокластеров с устойчивыми во времени формами и местоположением сформировали геопаттерны, среди которых отметим: а) Н-Н от 12.07.2021, 21.07.2021 и 28.07.2021 в пределах СЗ-3, СЗ-4 и внешней границы КЗ-5; б) Н-Н, начиная с 12.07.2021 в пределах СЗ-1 и СЗ-2, а также частично СЗ-3, СЗ-4 и внешней границы КЗ-2; в) L-L, начиная с 05.07.2021 в пределах СЗ-1 – СЗ-4 и внешней границы КЗ-5.

Для визуализации картограмм третьего ряда (см. *рис. 4в*) применена трёхцветная палитра с равномерной шкалой, с помощью которой были закрашены круговые символы в соответствии со значениями относительных величин  $\overline{ET}_{24,j}$ , рассчитываемых как

$$\overline{ET}_{24,j} = 100 \frac{ET_{24,j} - ET_{24,j}^{\min}}{ET_{24,j}^{\max} - ET_{24,j}^{\min}},$$

где  $ET_{24,j}$  — набор  $ET_{24}$  на  $j$ -ю дату съёмки;  $ET_{24,j}^{\max}$  и  $ET_{24,j}^{\min}$  — соответственно максимальное и минимальное значение набора  $ET_{24,j}$ .

При сопоставлении картограмм третьего ряда с аналогичными картограммами двух других наблюдается сходство форм текстур как с текстурами первого ряда (12.07.2021 и 21.07.2021), так и с геокластерами второго ряда (05.07.2021 и 29.08.2021).

### Анализ текстур временных рядов $ET_{24}$

Для анализа текстур временных рядов картограмм  $ET_{24}$  были привлечены данные наземного контроля реализации поливов (см. *табл. 1*). В соответствии с ними картограммы  $ET_{24}$  от 19.06.2021 отображают ситуацию по прошествии пяти часов после начала первого полива, когда ДМ-КД находилась под углом порядка 40–45° по отношению к технической дороге, что соответствует реализации этого полива на левой части СЗ-1. Отображённая текстура/геокластер (см. *рис. 4а, в/рис. 4б*) охватывает кольцеобразные участки этой СЗ-1, что является следствием попадания космосъёмки на соответствующий момент полива.

Картограмма от 05.07.2021 отображает ситуацию по прошествии двух суток после окончания третьего полива с кольцеобразной текстурой/геокластером на частях КЗ-5 и КЗ-6, приходящихся на третью и четвёртую СЗ. В свою очередь, картограммы от 12.07.2021, 21.07.2021 и 28.07.2021, соответствующие вторым, третьим и ещё раз третьим суткам после окончания соответственно четвёртого, пятого и шестого поливов, имеют схожие текстуры/геокластеры: а) в форме сектора, приходящиеся на СЗ-3 и СЗ-4; б) кольцеобразной формы, приходящиеся на СЗ-1 и СЗ-2. Очевидно, что отмеченная схожесть является следствием поливов, проведённых перед соответствующими съёмками КА Landsat-8.

Аналогичные по происхождению текстуры/геокластеры отображены и на картограммах от 06.08.2021 и 22.08.2021, соответствующих двум и четырём суткам после проведения соответственно восьмого и девятого поливов, границы которых приходятся на СЗ-2–СЗ-4. В целом это соответствует логике уменьшения влагозапасов корнеобитаемого слоя (КС) ПП по мере их расходования растительным покровом (РП).

В то же время текстуры/геокластеры картограмм от 29.08.2021, соответствующих восьмым суткам после проведения десятого полива, характеризуются кольцеобразными формами с уменьшающимися от центра к периферии значениями  $ET_{24}$ . Одна из причин этого может быть вызвана формированием аналогичного уменьшения запасов почвенной влаги в КС ПП в результате снижения поливных норм вдоль дождевого фронта ДМ-КД (Зейлигер и др., 2023).

Отметим также, что текстуры/геокластеры картограмм от 22.08.2021 и 29.08.2021 имеют схожий вид, несмотря на выпадение 5 мм осадков в момент проведения последней из этих съёмок, что может быть вызвано либо выпадением этих осадков после момента съёмки, либо отсутствием их значимой пространственной вариабельности по площади посева.

### Три уровня разметки геодатасета $\overline{ET}_{24}$

Для количественной оценки связей между пространственно-временными характеристиками слоёв геодатасета  $\overline{ET}_{24}$  с поливным режимом, а также техническими характеристиками ДМ-КД «Каскад» была проведена разметка слоёв этого геодатасета по трём видам зон управления поливами. С этой целью были использованы шейп-файлы, созданные на основе цифровой модели этой ДМ-КД.

#### Уровень секторальных зон

Полученные в результате разметки геодатасета  $\overline{ET}_{24}$  по секторальным зонам 36 поднаборов данных были использованы для оценки мер центральной тенденции и рассеяния. Найденные при этом значения применялись для представления этих поднаборов на основе коробчатых диаграмм (рис. 5).

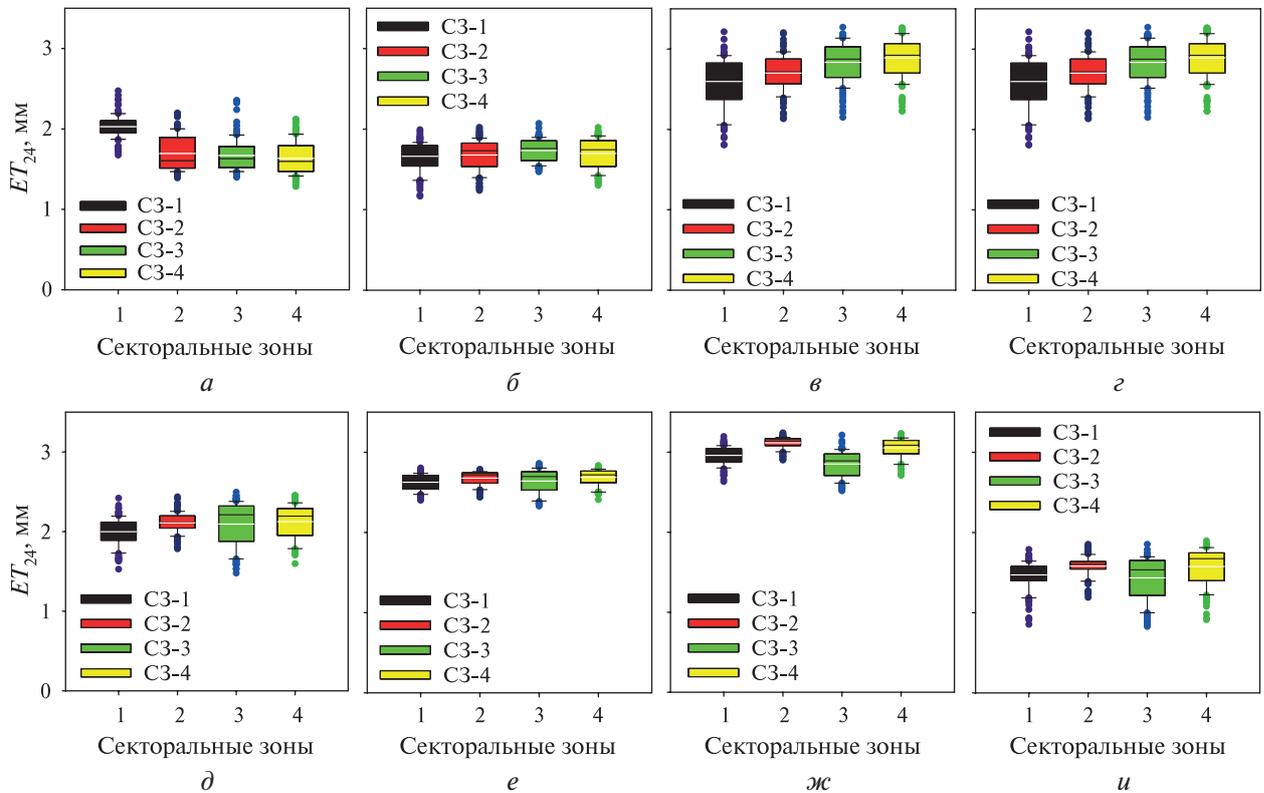


Рис. 5. Коробчатые диаграммы рядов поднаборов данных  $ET_{24}$  четырёх секторальных зон, соответствующие съёмкам: а — № 2; б — № 3; в — № 4; г — № 5; д — № 6; е — № 7; ж — № 8; и — № 9

Значения медиан и среднеквадратического отклонения четырёх СЗ, соответствующие моментам съёмки, представлены на рис. 6 (см. с. 108) в виде временных рядов. Диаграммы временных рядов, сгруппированных по моментам съёмки (см. рис. 5б–и), а также значения медиан и дисперсий  $ET_{24}$  СЗ (см. рис. 6), начиная со съёмки № 4 (12.07.2021), обладают достаточно схожей динамикой, указывающей на подобие реакции РП соответствующих секторальных частей посева. При этом сгруппированные на даты съёмки значения медиан (см. рис. 6а) и среднеквадратического отклонения (см. рис. 6б) имеют следующие соотношения, в которых верхний целочисленный индекс обозначает номер СЗ:

$$\overline{ET}_{24}^1 < \overline{ET}_{24}^2 < \overline{ET}_{24}^3 > \overline{ET}_{24}^4, \quad \sigma ET_{24}^1 > \sigma ET_{24}^2 < \sigma ET_{24}^3 < \sigma ET_{24}^4.$$

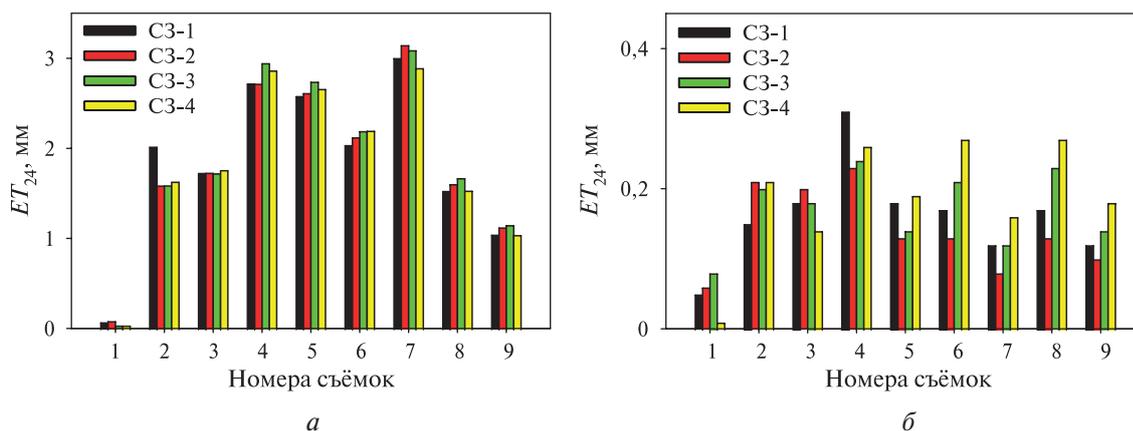


Рис. 6. Диаграммы временных рядов значений медиан (а) и среднеквадратического отклонения (б) рядов  $ET_{24}$  четырёх секторальных зон, сгруппированных по номерам съёмки

Очевидно, что оба эти соотношения отражают пространственную устойчивость варьирования потоков  $ET_{24}$ , которая сформировалась в результате последовательной реализации поливов секторов по направлению часовой стрелки. При этом отметим, что на момент съёмки № 3 (05.07.2021), предшествующей установлению обоих этих соотношений, имело место последовательное увеличение медианных значений, начиная с СЗ-1 и заканчивая СЗ-4. Одна из возможных причин последовавшего за этим изменения может быть связана с техническим сбоем при проведении четвёртого полива (07.07.2021), приведшим к неполному завершению полива последнего четвёртого сектора, что в дальнейшем могло повлечь за собой отставание в развитии не политой части этого сектора, выразившееся в более низких значениях медианы, а также более высоких значениях среднеквадратического отклонения в сравнении с другими секторами.

### Уровень кольцеобразных зон

В свою очередь 63 поднабора данных, полученные разметкой геодатасета  $\overline{ET_{24}}$  по КЗ, использованы для оценки соответствующих мер центральной тенденции и рассеяния, значения которых были применены для представления этих поднаборов на основе коробчатых диаграмм (рис. 7, см. с. 109).

Значения медиан и среднеквадратических отклонений семи КЗ, соответствующие моментам съёмки, приводятся на рис. 8 (см. с. 109) в виде временных рядов.

Как и в предыдущем случае с СЗ, временные ряды поднаборов данных, сгруппированных по моментам съёмки (см. рис. 7), а также значения медиан и среднеквадратического отклонения  $ET_{24}$ , соответствующих КЗ (см. рис. 8), имеют сходную динамику. Это также подтверждает отмеченный выше тезис об установившемся, начиная со съёмки № 4 (12.07.2021), подобии реакции РП КЗ на поливной режим.

Отметим при этом, что, начиная со съёмки № 3 (05.07.2021), ряды медианных значений (см. рис. 8а) и значений среднеквадратического отклонения (см. рис. 8б) имеют устойчивый разнонаправленный характер изменений (от 1-го до 7-го): в первом случае наблюдается уменьшение, а во втором — увеличение. По-видимому, первое из этих обстоятельств связано с более высокой стабильностью и упорядочиванием потоков  $ET_{24}$  в результате орошения на уровне КЗ, нежели на уровне СЗ. В то же самое время устойчивое уменьшение медиан поднаборов КЗ по мере удаления от центральной опоры, по всей видимости, было вызвано соответствующим снижением локальных поливных норм от центра к периферии, что является характерной чертой ДМ-КД с разбрызгивателями, не оснащёнными регуляторами давления. Таким образом, отмеченное значительное и устойчивое увеличение дисперсии КЗ по мере удаления от центральной опоры, по всей видимости, связано с другими факторами, имею-

щами как природный характер (например, увеличение пестроты почвенного покрова по мере увеличения площади КЗ), так и техногенный, такими как незавершённый полив, выход из строя одного или нескольких разбрызгивателей, снос ветром дождевого фронта и прочее.

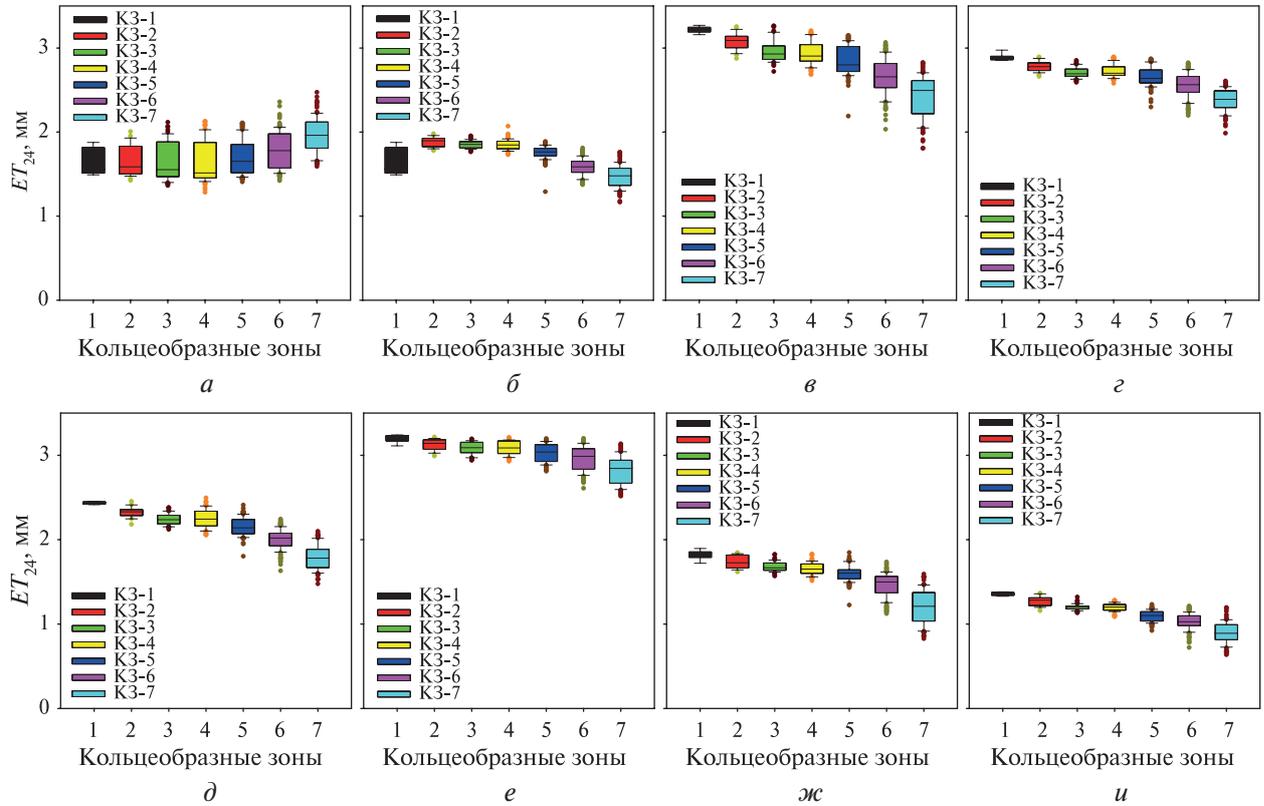


Рис. 7. Коробчатые диаграммы рядов поднаборов данных  $ET_{24}$  семи кольцеобразных зон, соответствующие съёмкам: а — № 2; б — № 3; в — № 4; г — № 5; д — № 6; е — № 7; ж — № 8; и — № 9

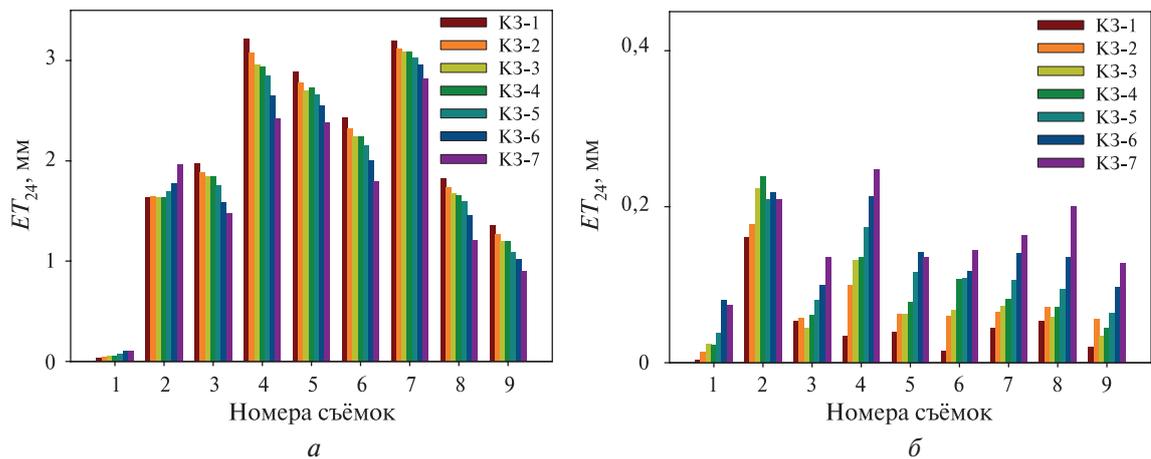


Рис. 8. Диаграммы временных рядов значений медианы (а) и среднеквадратического отклонения (б)  $ET_{24}$  семи кольцеобразных зон, сгруппированных по номерам съёмок

### Уровень зон кольцеобразных сегментов

На третьем заключительном этапе, с целью увеличения пространственной детализации при анализе слоёв геодатасета  $ET_{24}$ , были использованы 252 поднабора данных, полученные разметкой геодатасета  $ET_{24}$  по 28 КЗ. Найденные при этом медианные значения 252 поднаборов

данных, а также значения среднеквадратического отклонения для 224 поднаборов (за исключением приходящихся на КС-1) представлены на соответствующих диаграммах временных рядов (рис. 9).

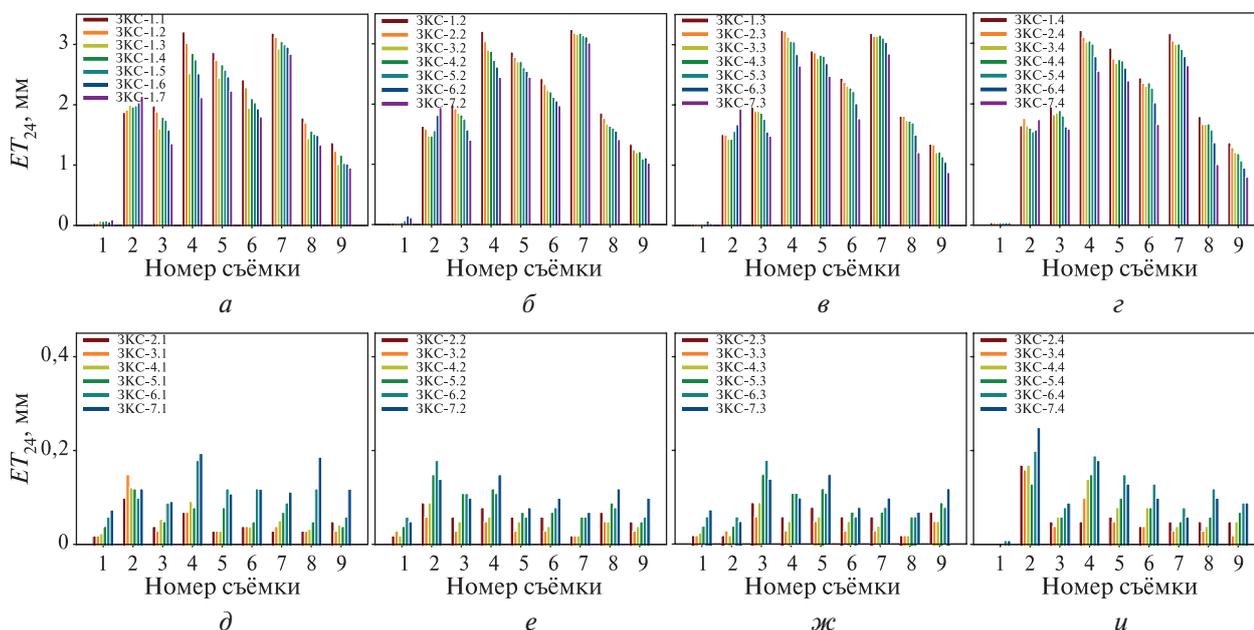


Рис. 9. Диаграммы временных рядов значений медианы (а–е) и среднеквадратического отклонения (д–и)  $ET_{24h}$ , сгруппированных по датам съёмок, соответствующих зонам кольцеобразных сегментов, в границах секторов: 1-го (а, д); 2-го (б, е); 3-го (в, ж); 4-го (з, и)

Как и в предыдущем случае с КЗ, временные ряды одномоментных значений медианы (см. рис. 9а–е) и среднеквадратического отклонения (см. рис. 9д–и) ЗКС, начиная со съёмки № 4 (12.07.2021), имеют сходную устойчивую динамику во всех четырёх секторах, которая в целом повторяет отмеченную выше аналогичную динамику КЗ (см. рис. 8). При этом относительная разность медиан крайних КЗ (КС-1 и КС-7) (см. рис. 8а), составляющая в среднем 20–30 %, превышает соответствующую разность медиан ЗКС (10–20 %) (см. рис. 9а–е). Аналогичное соотношение характерно и при сопоставлении среднеквадратического отклонения КЗ (см. рис. 8б) и ЗКС (см. рис. 9д–е).

Одно из объяснений отмеченного обстоятельства связано с очередностью реализации поливов отдельных секторов, что могло приводить к соответствующей реакции РП, выражающейся в значительных отличиях медианных значений поднаборов данных по ЗКС. Для её подтверждения была проведена количественная оценка значимости различий медиан семи ЗКС, распределённых по четырём секторам, с использованием непараметрического теста Краскала–Уоллеса (KW) (Kruskal, Wallis, 1952). Его компьютерная реализация была выполнена в среде Python с использованием метода `kruskal` модуля `stats` библиотеки `scipy`. В этом коде для оценки значимости различий между тестируемыми парами поднаборов данных  $ET_{24h}$  ЗКС использовалось пороговое значение  $p\text{-value} = 0,05$ , соответствующее 95 % вероятности. Результаты проведённого тестирования представлены на рис. 10 (см. с. 111) в виде наборов матричных диаграмм, соответствующих четырём секторам и девяти сеансам съёмок. Ячейки этих диаграмм, закрашенные зелёным цветом, соответствуют парам поднаборов ЗКС, достоверность различия медиан которых подтверждена тестом KW, а полученные значения значимости различий отображены в ячейках, расположенных зеркально относительно диагонали.

Анализ представленных на рис. 10 результатов теста KW показывает, что если на моменты съёмок № 1 и 2 (18.05.2021 и 19.06.2021), предшествовавших поливам, доля пар с достоверно различными значениями медиан поднаборов КС составляла 52 %, то на моменты съёмок после начала орошения она последовательно увеличивалась с 82 до 87 %.

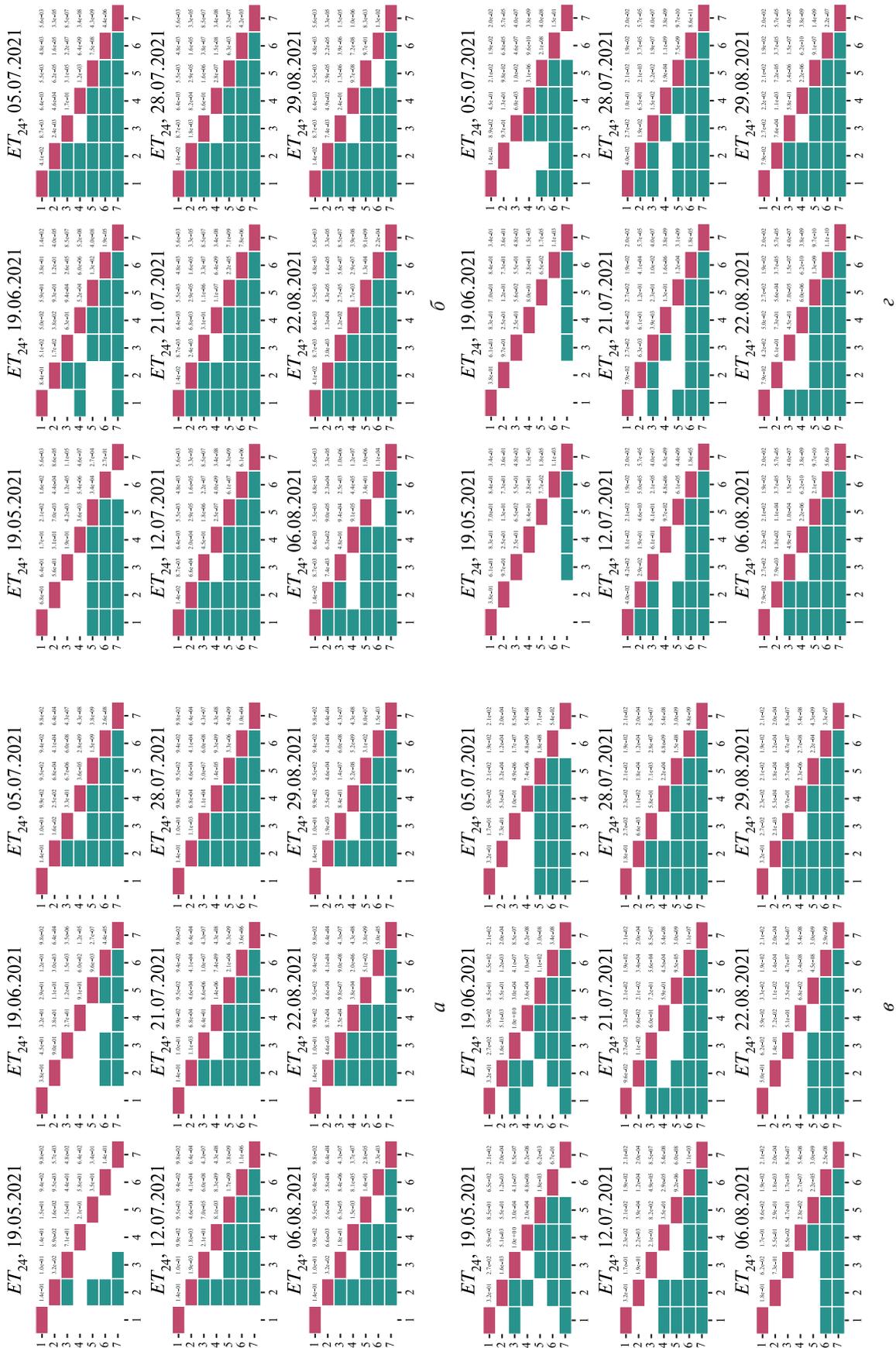
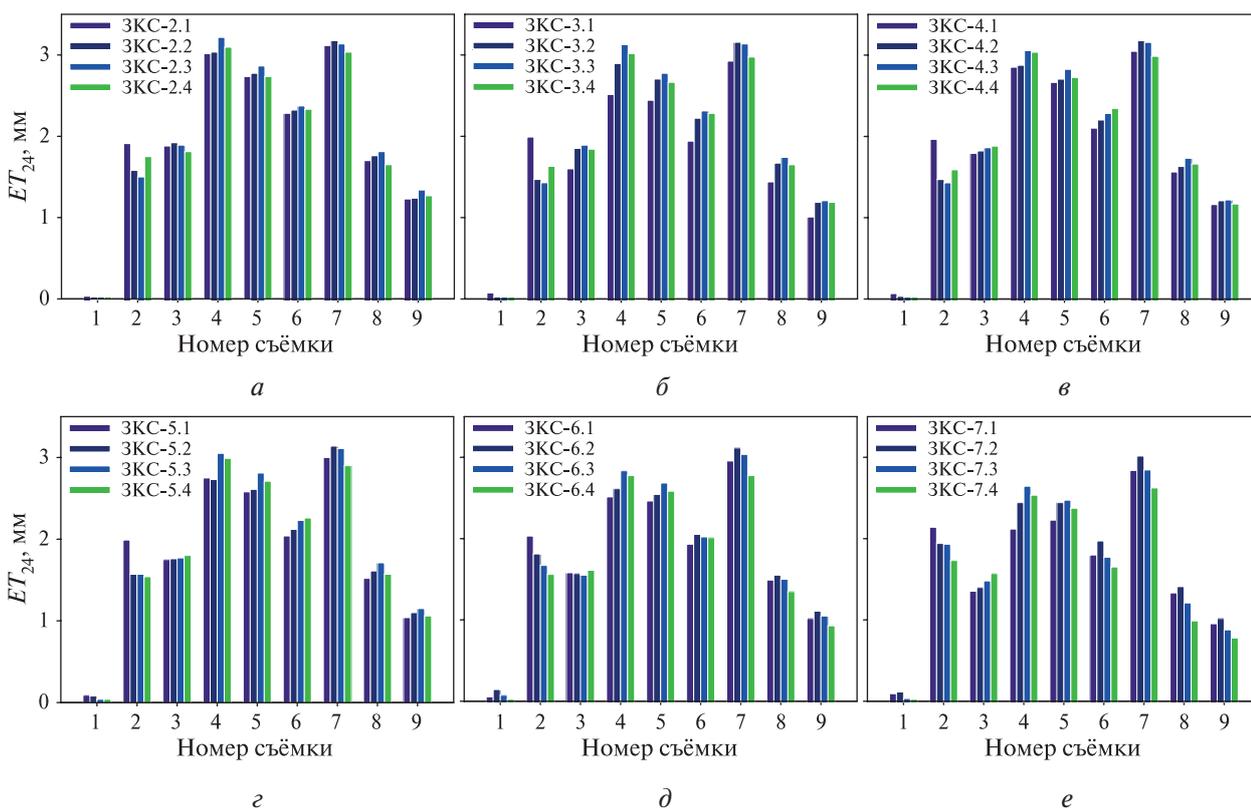


Рис. 10. Диаграммы результатов статистического теста  $ET_{24}$  зон кольцеобразных сегментов, соответствующих девяти съёмкам в границах секторов: а — 1-го; б — 2-го; в — 3-го; г — 4-го

При исключении из этих долей части, приходящейся на КС-1 первого сектора с отрицательными значениями теста  $KW$ , что, по-видимому, связано с малым объёмом данных соответствующих поднаборов, эта доля возрастала соответственно с 89 до 94 %.

Обращает на себя внимание также наличие отрицательных результатов теста пар КС-3 и КС-4 при одновременно положительных результатах теста этих пар с соседними, соответственно КС-2 и КС-5, которые имели место: а) в восьми случаях из девяти для первого сектора (см. *рис. 10а*); б) в семи случаях из девяти для второго сектора (см. *рис. 10б*); в) в восьми случаях из девяти для третьего сектора (см. *рис. 10в*); г) в шести случаях из девяти для четвертого сектора (см. *рис. 10г*). Это обстоятельство может быть вызвано более плавным изменением поливных норм вдоль дождевого фронта ДМ-КД на границе между соответствующими тележками, что привело к соответствующему сглаживанию.

На заключительном этапе анализа геодатасета  $\overline{ET}_{24}$  проведено сравнение результатов сегментации его слоёв по СЗ и ЗКС. Для этого были сформированы диаграммы временных рядов медианных значений поднаборов КС-2–КС-6, сгруппированных по каждому из четырёх секторов (*рис. 11*). Отметим при этом, что временные ряды значений медиан  $\overline{ET}_{24}$  поднаборов данных кольцеобразных сегментов (см. *рис. 11а–е*) имеют в целом внешнее сходство как между собой, так и с аналогичными рядами медиан  $\overline{ET}_{24}$  поднаборов данных СЗ (см. *рис. 6а*), что выражается в положительных или близких к нулю тенденциях изменения медиан поднаборов кольцеобразных сегментов (см. *рис. 11*) в соответствии с последовательностью проведения поливов секторов (по направлению часовой стрелки) на моменты съёмки после начала проведения поливов, за исключением КС-6 и КС-7 на моменты съёмки № 7–9 (06.08.2021, 21.08.2021 и 29.08.2021), имеющих отрицательные тенденции.



*Рис. 11.* Диаграммы временных рядов значений медиан поднаборов данных  $\overline{ET}_{24}$  зон кольцеобразных сегментов, сгруппированных по секторам 1–4 на даты съёмки, приходящихся на кольцеобразные зоны: а — КЗ-2; б — КЗ-3; в — КЗ-4; г — КЗ-5; д — КЗ-6; е — КЗ-7

Со всей очевидностью можно констатировать, что отмеченные положительные тенденции изменения медианных значений (см. *рис. 11*) стали результатом снижения потоков  $\overline{ET}_{24}$

по мере удаления моментов съёмки от дат предшествующих поливов секторов, что в целом соответствует логике последовательного уменьшения запасов почвенной влаги в КС ПП за счёт испарения из поверхностных слоёв ПП, а также транспирации РП. В соответствии с этой логикой в пределах КЗ в результате расходования запасов почвенной влаги, пропорционального промежутку времени между моментом съёмки и датой проведения полива, должно происходить снижение потока  $ET_{24}$  в направлении, противоположном последовательности проведения полива. Отмеченные же случаи отрицательных тенденций не противоречат этой логике, поскольку они приходятся на моменты съёмки № 7, 8 (06.08.2021 и 21.08.2021), которые пришлись на предпоследний (04–07.08.2021) и последний (20–22.08.2021) поливы, когда эти поливы на пространствах третьего и четвёртого секторов были либо ещё не начаты, либо не полностью завершены. Достаточно наглядно это отображено на диаграммах, соответствующих последним двум съёмкам № 8, 9 (22.08.2021 и 29.08.2021), свидетельствующих об увеличении различий в значениях потоков  $ET_{24}$  кольцеобразных паттернов по мере исчерпания влагозапасов после девятого полива (20–22.08.2021). При этом не следует исключать влияние дополнительных факторов, приведших к формированию отрицательного тренда на момент последней съёмки № 9 (29.08.2021), таких как недостаточные влагозапасы ПП-КС двух крайних КЗ в результате последнего полива (20–22.08.2021) с уменьшенной нормой 13 мм, а также технические проблемы, связанные с неполным завершением поливов четвёртого сектора.

## Выводы и заключение

Применение разработанной методики сегментирования рассчитанного по результатам космосъёмки КА Landsat-8 суточного актуального потока суммарного испарения  $ET_{24}$ , сформированного на пространстве производственного посева сои в результате его орошения посредством ДМ-КД «Каскад» с тремя характерными видами зон управления (секторальным, кольцеобразным и кольцевых сегментов), позволило оценить соответствующие этим зонам параметры мер центральной тенденции и рассеяния. Их анализ, а также сопоставление с режимом проведения поливов дали возможность охарактеризовать влияние реализации поливного режима на зональную дифференциацию  $ET_{24}$  с уменьшающейся интенсивностью в радиальном направлении, что характерно для ДМ-КД с разбрызгивателями, не оснащёнными регуляторами давления.

Полученные результаты сегментирования  $ET_{24}$  с использованием наборов данных пиксельного уровня позволили выявить тесную связь между формируемыми в результате орошения запасами почвенной влаги, доступными для растительного покрова, и соответствующими им зональными характеристиками потока  $ET_{24}$ . Таким образом, в рамках парадигмы точного земледелия, основанной на трёх конкретиках, полученные результаты можно рассматривать в качестве основы использования как текущих, так и аналогичных будущих космоданных в виде источника пространственно-временных характеристик состояния орошаемых агроценозов, связанных с водным стрессом, которые необходимы для практической реализации пространственно-дифференцированного дождевания. Это лишний раз подчёркивает критическую роль дистанционного зондирования Земли в поступательном развитии исследований, направленных на устойчивое повышение урожайности и водоэффективности орошаемого земледелия.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-27-00438, <https://rscf.ru/project/23-27-00438/>.

## Литература

1. Ермолаева О. С., Зейлигер А. М. Анализ трендов потоков суммарного испарения (за 2003–2017 гг.) по данным продукта MOD16A2 для территории Марксовского района Саратовской области // Природообустройство. 2021. № 2. С. 16–25. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-16-25.

2. Ермолаева О. С., Зейлигер А. М. Эффективность использования посевами орошаемой люцерны запасов почвенной влаги // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 2. С. 23–29. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-2-23-29.
3. Зейлигер А. М. Точное (дифференцированное) орошаемое земледелие — технология повышения эффективности орошения и снижения нагрузки на окружающую среду // Сб. науч. докл. ВИМ. 2010. С. 633–638.
4. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. (2016а) Информационные технологии в мониторинге богарных и орошаемых агроценозов // Современные наукоемкие технологии. 2016. Т. 10. № 1. С. 62–66.
5. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. (2016б) Информационно-технологические основы пространственно-дифференцированного дождевания посевов сельскохозяйственных культур // Международный научно-исслед. журн. 2016. Т. 9–2. № 51. С. 41–44. DOI: 10.18454/IRJ.2016.51.113.
6. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С., Музылев Е. Л. и др. Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 33–43. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43.
7. Зейлигер А. М., Затицацкий С. В., Ермолаева О. С., Колганов Д. А. Анализ пространственного варьирования влажности почвенного покрова вдоль фронта дождевальной машины // Природообустройство. 2023. № 3. С. 15–22. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-15-22.
8. Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Тр. по с.-х. метеорологии. 1928. № 20. С. 165–177.
9. Якушев В. П., Якушев В. В. Информационное обеспечение точного земледелия. СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2007. 384 с.
10. Allen R. G., Walter I. A., Elliott R. L. et al. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE, Reston, VA, USA, 2005. DOI: 10.1061/9780784408056.
11. Allen R. G., Tasumi M., Morse A. et al. (2007a) Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications // J. Irrigation and Drainage Engineering. 2007. V. 133. No. 4. P. 395–406. DOI: 10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(395).
12. Allen R., Tasumi M., Trezza R. (2007b) Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model // J. Irrigation and Drainage Engineering. 2007. V. 133. No. 4. P. 380–394. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).
13. Anselin L. Local Indicators of Spatial Association—LISA // Geographical Analysis. 1995. V. 27. No. 2. P. 93–115. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x.
14. Asadi M., Valizadeh Kamran K. Comparison of SEBAL, METRIC, and ALARM algorithms for estimating actual evapotranspiration of wheat crop // Theoretical and Applied Climatology. 2022. V. 149. P. 327–337. DOI: 10.1007/s00704-022-04026-3.
15. Bastiaanssen W. G. M., Menenti M., Feddes R. A., Holtslag A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation // J. Hydrology. 1998. V. 212–213. P. 198–212. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4.
16. Bazzi C. L., Schenatto K., Upadhyaya S. et al. Optimal placement of proximal sensors for precision irrigation in tree crops // Precision Agriculture 2018. V. 20. No. 4. P. 663–674. DOI: 10.1007/S11119-018-9604-3.
17. Cetin M., Alsenjar O., Aksu H. et al. Comparing actual evapotranspiration estimations by METRIC to in-situ water balance measurements over an irrigated field in Turkey // Hydrological Sciences J. 2023. V. 68. Iss. 8. P. 1162–1183. DOI: 10.1080/02626667.2023.2198649.
18. Cheng Q., Tao M., Chen X., Binley A. Evaluation of electrical resistivity tomography (ERT) for mapping the soil–rock interface in karstic environments // Environmental Earth Sciences. 2019. V. 78. No. 15. Article 439. DOI: 10.1007/s12665-019-8440-8.
19. De Lara A., Khosla R., Longchamps L. Characterizing spatial variability in soil water content for precision irrigation management // Agronomy. 2018. V. 8. No. 5. Article 59. DOI: 10.3390/AGRONOMY8050059.
20. Elkatoury A., Alazba A. A., Mossad A. Estimating evapotranspiration using coupled remote sensing and three SEB models in an arid region // Environmental Processes. 2020. V. 7. No. 1. P. 109–133. DOI: 10.1007/s40710-019-00410-w.
21. Fontanet M., Scudiero E., Skaggs T. et al. Dynamic management zones for irrigation scheduling // Agricultural Water Management. 2020. V. 238. Article 106207. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2020.106207.
22. Gonzalez-Dugo V., Goldhamer D., Zarco-Tejada P. J., Fereres E. Improving the precision of irrigation in a pistachio farm using an unmanned airborne thermal system // Irrigation Science. 2014. V. 33. No. 1. P. 43–52. DOI: 10.1007/S00271-014-0447-Z.
23. Han L., Wang C., Liu Q. et al. Soil moisture mapping based on multi-source fusion of optical, near-infrared, thermal infrared, and digital elevation model data via the Bayesian maximum entropy framework // Remote Sensing. 2020. V. 12. Iss. 23. Article 3916. DOI: 10.3390/RS12233916.
24. Irmak S., Odhiambo L. O., Kranz W. L., Eisenhauer D. E. Irrigation efficiency and uniformity, and crop water use efficiency // Biological Systems Engineering: Papers and Publications. 2011. Article 451.

25. *Jamshidi S., Zand-parsa S., Pakparvar M., Niyogi D.* Evaluation of evapotranspiration over a semi-arid region using multi-resolution data sources // *J. Hydrometeorology*. 2019. V. 20. P. 947–964. DOI: 10.1175/JHM-D-18-0082.1.
26. *Javadi S.H., Guerrero A., Mouazen A.M.* Clustering and smoothing pipeline for management zone delineation using proximal and remote sensing // *Sensors*. 2022. V. 22. Iss. 2. Article 645. DOI: 10.3390/S22020645.
27. *Kamyab A.D., Mokhtari S., Jafarinia R.* A comparative study in quantification of maize evapotranspiration for Iranian maize farm using SEBAL and METRIC-1 EEFLux algorithms // *Acta Geophysica*. 2022. V. 70. No. 1. P. 319–332. DOI: 10.1007/s11600-021-00704-4.
28. *Kruskal W.H., Wallis W.A.* Use of ranks in one-criterion variance analysis // *J. American Statistical Association*. 1952. V. 47. No. 260. P. 583–621. DOI: 10.1080/01621459.1952.10483441.
29. *Madugundu R., Al-Gaadi K., Tola E. et al.* Performance of the METRIC model in estimating evapotranspiration fluxes over an irrigated field in Saudi Arabia using Landsat-8 images // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. V. 21. P. 6135–6151. DOI: 10.5194/hess-21-6135-2017.
30. *Morillo J.G., Martín M., Camacho E. et al.* Toward precision irrigation for intensive strawberry cultivation // *Agricultural Water Management*. 2015. V. 151. P. 43–51. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2014.09.021.
31. *Nisa Z., Khan M., Govind A. et al.* Evaluation of SEBS, METRIC-EEFLux, and QWaterModel actual evapotranspiration for a mediterranean cropping system in southern Italy // *Agronomy*. 2021. V. 11. No. 2. Article 345. DOI: 10.3390/agronomy11020345.
32. *Ohana-Levi N., Bahat I., Peeters A. et al.* A weighted multivariate spatial clustering model to determine irrigation management zones // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. V. 162. P. 719–731. DOI: 10.1016/J.COMPAG.2019.05.012.
33. *Oldoni H., Bassoi L.H.* Delineation of irrigation management zones in a Quartzipsamment of the Brazilian semiarid region // *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*. 2016. V. 51. No. 9. P. 1283–1294. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900028.
34. *Olmedo G., Ortega-Farías S., de la Fuente-Sáiz D. et al.* water: Tools and functions to estimate actual evapotranspiration using land surface energy balance models in R // *The R J*. 2016. V. 8. P. 352–369. DOI: 10.32614/RJ-2016-051.
35. *Ortega-Salazar S., Ortega-Farías S., Kilic A., Allen R.* Performance of the METRIC model for mapping energy balance components and actual evapotranspiration over a superintensive drip-irrigated olive orchard // *Agricultural Water Management*. 2021. V. 251. Article 106861. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106861.
36. *Ortuani B., Sona G., Ronchetti G. et al.* Integrating geophysical and multispectral data to delineate homogeneous management zones within a vineyard in Northern Italy // *Sensors*. 2019. V. 19. Iss. 18. Article 3974. DOI: 10.3390/S19183974.
37. *Poblete-Echeverría C., Ortega-Farías S.* Calibration and validation of a remote sensing algorithm to estimate energy balance components and daily actual evapotranspiration over a drip-irrigated Merlot vineyard // *Irrigation Science*. 2012. V. 30. P. 537–553. DOI: 10.1007/s00271-012-0381-x.
38. *Reyes-González A., Kjaersgaard J., Trooien T. et al.* Comparison of leaf area index, surface temperature, and actual evapotranspiration estimated using the METRIC model and in situ measurements // *Sensors*. 2019. V. 19. Iss. 8. Article 1857. DOI: 10.3390/s19081857.
39. *Rojo F., Kizer E., Upadhyaya S. et al.* A leaf monitoring system for continuous measurement of plant water status to assist in precision irrigation in grape and almond crops // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. No. 16. P. 209–215. DOI: 10.1016/J.IFACOL.2016.10.039.
40. *Scudiero E., Teatini P., Manoli G. et al.* Workflow to establish time-specific zones in precision agriculture by spatiotemporal integration of plant and soil sensing data // *Agronomy*. 2018. V. 8. Iss. 11. Article 253. DOI: 10.3390/AGRONOMY8110253.
41. *Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. et al.* Mapping management zones based on soil apparent electrical conductivity and remote sensing for implementation of variable rate irrigation—Case study of corn under a center pivot // *Water*. 2020. V. 12. Iss. 12. Article 3427. DOI: 10.3390/W12123427.
42. *Singh R.K., Senay G.B.* Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States // *Water*. 2016. V. 8. Iss. 1. Article 9. DOI: 10.3390/w8010009.
43. *Smith R.J., Baillie J., McCarthy A.C., Raine S.R., Baillie C.P.* Review of precision irrigation technologies and their application. National Centre for Engineering in Agriculture Publication 1003017/1, USQ, Toowoomba, 2010.
44. *Song X., Zhang G., Liu F. et al.* Modeling spatio-temporal distribution of soil moisture by deep learning-based cellular automata model // *J. Arid Land*. 2016. V. 8. No. 5. P. 734–748. DOI: 10.1007/S40333-016-0049-0.
45. *Tawalbeh Z.M., Bawazir A.S., Fernald A., Sabie R.* Spatiotemporal variabilities in evapotranspiration of alfalfa: A case study using remote sensing METRIC and SSEBop models and eddy covariance // *Remote Sensing*. 2024. V. 16. Iss. 13. Article 2290. DOI: 10.3390/rs16132290.

46. Vera J., Conejero W., Conesa M. R., Ruiz-Sánchez M. C. Irrigation factor approach based on soil water content: A nectarine orchard case study // *Water*. 2019. V. 11. Iss. 3. Article 589. DOI: 10.3390/w11030589.
47. Wang J., Li H., Zhang G. et al. Estimation of evapotranspiration for irrigated artificial grasslands in typical steppe areas using the metric model // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019. V. 17. No. 6. P. 13759–13776. DOI: 10.15666/aeer/1706\_1375913776.
48. Water for sustainable food and agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017. 33 p.
49. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Pchelkin V. V. 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 // *Sensors*. 2023. V. 23. Iss. 5. Article 2601. DOI: 10.3390/s23052601.
50. Zeyliger A., Muzalevskiy K., Ermolaeva O. et al. Mapping soil surface moisture of an agrophytocenosis via a neural network based on synchronized radar and multispectral optoelectronic data of SENTINEL-1,2—Case study on test sites in the lower Volga region // *Sustainability*. 2024. V. 16. Iss. 21. Article 9606. DOI: 10.3390/su16219606.

## Segmentation of daily total evaporation flow of irrigated soybean crop using the METRIC model and Landsat-8 data

A. M. Zeyliger<sup>1,4</sup>, A. V. Dobrokhotov<sup>2</sup>, O. S. Ermolaeva<sup>3</sup>, Ya. S. Kotov<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup> *Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia*  
*E-mail: azeiliguer@mail.ru*

<sup>2</sup> *Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia*  
*E-mail: dobralexey@gmail.com*

<sup>3</sup> *Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy*  
*Moscow 127434, Russia*  
*E-mail: ol\_ermolaeva@mail.ru*

<sup>4</sup> *Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering*  
*named after N. I. Vavilov, Saratov 410012, Russia*  
*E-mail: dmi.kolg@mail.ru*

<sup>5</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology*  
*Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russia*  
*E-mail: kotov.ias@phystech.edu*

The methods for segmenting irrigated agroecosystems into management zones using remote sensing data form the basis for translating research findings into the practice of precision irrigated agriculture. One of the parameters used for segmentation is the total evaporation flow, which is closely related to the availability of moisture reserves in the root zone of the soil cover for agricultural plants. This paper presents the results of analyzing the segmentation of daily total evaporation flows from an irrigated soybean crop during the 2021 growing season across three types of management zones of the Kaskad circular pivot irrigation machine (UNPO Povolzh'e of Vavilov University, Engels District, Saratov Region). For this purpose, a three-dimensional geodataset was utilized, including nine temporal layers of actual daily total evaporation flow ( $ET_{24}$ ) calculated using the METRIC model with data from nine cloud-free satellite images from Landsat-8, as well as ground-based weather monitoring data. In the initial phase of spatial analysis of the  $ET_{24}$  layers, methods employed included: 1) interpolation with inverse distance weighting, 2) clustering using the local Moran's I index, and 3) visualization of normalized values with graduated symbols. Based on the comparison of geospatial patterns identified on the calculated  $ET_{24}$  maps with the irrigation regime, hypotheses were formulated regarding their anthropogenic origin. The corresponding testing of  $ET_{24}$  was conducted for three types of management zones of Kaskad: 1) sectoral, 2) ring-shaped, and 3) circular segments. The necessary layer marking for the geodataset was implemented using shapefiles derived from the geometric characteristics of this pivot irrigation machine. Statistical characteristics of central tendency and dispersion measures were calculated for the marked subsets of  $ET_{24}$ . The analysis of these results revealed spatial and temporal

relationships both among layers and within individual zones. It was found that there was a consistent decrease in median values of segmented  $ET_{24}$  flow from the center of rotation of the pivot irrigation machine towards the periphery of the circular contour formed by the irrigated soybean crop. This trend was attributed to a reduction in irrigation norms from the center to the periphery of the pressure front of the pivot irrigation machine, whose sprinklers were not equipped with pressure regulators. Thus, the research findings obtained through the developed  $ET_{24}$  flow segmentation method confirmed the hypothesis regarding the anthropogenic origin of identified geospatial patterns and established a connection between statistical characteristics of zonal distribution of this flow and technical specifications of Kaskad along with its implemented irrigation regime.

**Keywords:** precision irrigated agriculture, irrigated agroecosystem, circular pivot irrigation machine, management zones, total evaporation flow, anthropogenic patterns, METRIC model, Landsat-8 data, image segmentation, Kruskal–Wallis test

Accepted: 10.02.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-99-119

## References

1. Ermolaeva O. S., Zeyliger A. M., Analysis of trends of total evaporation fluxes (for 2003–2017) according to the data of product MOD16A2 for the territory of the Marksovsky District of the Saratov Region, *Prirodoobustrojstvo*, 2021, No. 2, pp. 16–25 (in Russian), DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-16-25.
2. Ermolaeva O. S., Zeyliger A. M., Efficiency of use of soil moisture reserves by irrigated alfalfa crops, *Melioration and Water Management*, 2023, No. 2, pp. 23–29 (in Russian), DOI: 10.32962/0235-2524-2023-2-23-29.
3. Zeyliger A. M., Precise (differentiated) irrigated agriculture is a technology to improve irrigation efficiency and reduce environmental stress, *Cbornik nauchnykh dokladov VIM*, 2010, pp. 633–638 (in Russian).
4. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S. (2016a), Information technologies in rain-fed and irrigated agroecosystem monitoring, *Modern High Technologies*, 2016, V. 10, No. 1, pp. 62–66 (in Russian).
5. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S. (2016b), Information and technological bases of the spatially differentiated sprinkler irrigation of agricultural crops, *Intern. Scientific Research J.*, 2016, V. 9–2, No. 51, pp. 41–44 (in Russian), DOI: 10.18454/IRJ.2016.51.113.
6. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Muzylev E. L. et al., Computer analysis of water stress regimes of irrigated agroecosystem using the swap model and ground and space monitoring data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 33–43 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43.
7. Zeyliger A. M., Zatinatsky S. V., Ermolaeva O. S., Kolganov D. A., Analysis of spatial variation of soil cover moisture along the front of the sprinkling machine, *Prirodoobustrojstvo*, 2023, No. 3, pp. 15–22 (in Russian), DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-15-22.
8. Selyaninov G. T., On agricultural climate assessment, *Trudy po sel'skokhozyaistvennoi meteorologii*, 1928, No. 20, pp. 165–177 (in Russian).
9. Yakushev V. P., Yakushev V. V., *Informacionnoe obespechenie tochnogo zemledeliya* (Information support for precision farming), Saint Petersburg: Izd. PIYaF RAN, 2007, 384 p. (in Russian).
10. Allen R. G., Walter I. A., Elliott R. L. et al., *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation*, ASCE, Reston, VA, USA, 2005, DOI: 10.1061/9780784408056.
11. Allen R. G., Tasumi M., Morse A. et al. (2007a), Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications, *J. Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, V. 133, No. 4, pp. 395–406, DOI: 10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(395).
12. Allen R., Tasumi M., Trezza R. (2007b), Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model, *J. Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, V. 133, No. 4, pp. 380–394, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380).
13. Anselin L., Local Indicators of Spatial Association—LISA, *Geographical Analysis*, 1995, V. 27, No. 2, pp. 93–115, DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x.
14. Asadi M., Valizadeh Kamran K., Comparison of SEBAL, METRIC, and ALARM algorithms for estimating actual evapotranspiration of wheat crop, *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, V. 149, pp. 327–337, DOI: 10.1007/s00704-022-04026-3.
15. Bastiaanssen W. G. M., Menenti M., Feddes R. A., Holtslag A. A. M., A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation, *J. Hydrology*, 1998, V. 212–213, pp. 198–212, DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4.

16. Bazzi C. L., Schenatto K., Upadhyaya S. et al., Optimal placement of proximal sensors for precision irrigation in tree crops, *Precision Agriculture*, 2018, V. 20, No. 4, pp. 663–674, DOI: 10.1007/S11119-018-9604-3.
17. Cetin M., Alsenjar O., Aksu H. et al., Comparing actual evapotranspiration estimations by METRIC to in-situ water balance measurements over an irrigated field in Turkey, *Hydrological Sciences J.*, 2023, V. 68, Iss. 8, pp. 1162–1183, DOI: 10.1080/02626667.2023.2198649.
18. Cheng Q., Tao M., Chen X., Binley A., Evaluation of electrical resistivity tomography (ERT) for mapping the soil–rock interface in karstic environments, *Environmental Earth Sciences*, 2019, V. 78, No. 15, Article 439, DOI: 10.1007/s12665-019-8440-8.
19. De Lara A., Khosla R., Longchamps L., Characterizing spatial variability in soil water content for precision irrigation management, *Agronomy*, 2018, V. 8, No. 5, Article 59, DOI: 10.3390/AGRONOMY8050059.
20. Elkatoory A., Alazba A. A., Mossad A., Estimating evapotranspiration using coupled remote sensing and three SEB models in an arid region, *Environmental Processes*, 2020, V. 7, No. 1, pp. 109–133, DOI: 10.1007/s40710-019-00410-w.
21. Fontanet M., Scudiero E., Skaggs T. et al., Dynamic management zones for irrigation scheduling, *Agricultural Water Management*, 2020, V. 238, Article 106207, DOI: 10.1016/J.AGWAT.2020.106207.
22. Gonzalez-Dugo V., Goldhamer D., Zarco-Tejada P. J., Fereres E., Improving the precision of irrigation in a pistachio farm using an unmanned airborne thermal system, *Irrigation Science*, 2014, V. 33, No. 1, pp. 43–52, DOI: 10.1007/S00271-014-0447-Z.
23. Han L., Wang C., Liu Q. et al., Soil moisture mapping based on multi-source fusion of optical, near-infrared, thermal infrared, and digital elevation model data via the Bayesian maximum entropy framework, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Iss. 23, Article 3916, DOI: 10.3390/RS12233916.
24. Irmak S., Odhiambo L. O., Kranz W. L., Eisenhauer D. E., Irrigation efficiency and uniformity, and crop water use efficiency, *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*, 2011, Article 451.
25. Jamshidi S., Zand-parsa S., Pakparvar M., Niyogi D., Evaluation of evapotranspiration over a semi-arid region using multi-resolution data sources, *J. Hydrometeorology*, 2019, V. 20, pp. 947–964, DOI: 10.1175/JHM-D-18-0082.1.
26. Javadi S. H., Guerrero A., Mouazen A. M., Clustering and smoothing pipeline for management zone delineation using proximal and remote sensing, *Sensors*, 2022, V. 22, Iss. 2, Article 645, DOI: 10.3390/S22020645.
27. Kamyab A. D., Mokhtari S., Jafarinia R., A comparative study in quantification of maize evapotranspiration for Iranian maize farm using SEBAL and METRIC-1 EEFLux algorithms, *Acta Geophysica*, 2022, V. 70, No. 1, pp. 319–332, DOI: 10.1007/s11600-021-00704-4.
28. Kruskal W. H., Wallis W. A., Use of ranks in one-criterion variance analysis, *J. American Statistical Association*, 1952, V. 47, No. 260, pp. 583–621, DOI: 10.1080/01621459.1952.10483441.
29. Madugundu R., Al-Gaadi K., Tola E. et al., Performance of the METRIC model in estimating evapotranspiration fluxes over an irrigated field in Saudi Arabia using Landsat-8 images, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, V. 21, pp. 6135–6151, DOI: 10.5194/hess-21-6135-2017.
30. Morillo J. G., Martín M., Camacho E. et al., Toward precision irrigation for intensive strawberry cultivation, *Agricultural Water Management*, 2015, V. 151, pp. 43–51, DOI: 10.1016/J.AGWAT.2014.09.021.
31. Nisa Z., Khan M., Govind A. et al., Evaluation of SEBS, METRIC-EEFLux, and QWaterModel actual evapotranspiration for a mediterranean cropping system in southern Italy, *Agronomy*, 2021, V. 11, No. 2, Article 345, DOI: 10.3390/agronomy11020345.
32. Ohana-Levi N., Bahat I., Peeters A. et al., A weighted multivariate spatial clustering model to determine irrigation management zones, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, V. 162, pp. 719–731, DOI: 10.1016/J.COMPAG.2019.05.012.
33. Oldoni H., Bassoi L. H., Delineation of irrigation management zones in a Quartzipsamment of the Brazilian semiarid region, *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 2016, V. 51, No. 9, pp. 1283–1294, DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900028.
34. Olmedo G., Ortega-Farías S., de la Fuente-Sáiz D. et al., water: Tools and functions to estimate actual evapotranspiration using land surface energy balance models in R, *The R J.*, 2016, V. 8, pp. 352–369, DOI: 10.32614/RJ-2016-051.
35. Ortega-Salazar S., Ortega-Farías S., Kilic A., Allen R., Performance of the METRIC model for mapping energy balance components and actual evapotranspiration over a superintensive drip-irrigated olive orchard, *Agricultural Water Management*, 2021, V. 251, Article 106861, DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106861.
36. Ortuani B., Sona G., Ronchetti G. et al., Integrating geophysical and multispectral data to delineate homogeneous management zones within a vineyard in Northern Italy, *Sensors*, 2019, V. 19, Iss. 18, Article 3974, DOI: 10.3390/S19183974.
37. Poblete-Echeverría C., Ortega-Farías S., Calibration and validation of a remote sensing algorithm to estimate energy balance components and daily actual evapotranspiration over a drip-irrigated Merlot vineyard, *Irrigation Science*, 2012, V. 30, pp. 537–553, DOI: 10.1007/s00271-012-0381-x.

38. Reyes-González A., Kjaersgaard J., Trooien T. et al., Comparison of leaf area index, surface temperature, and actual evapotranspiration estimated using the METRIC model and in situ measurements, *Sensors*, 2019, V. 19, Iss. 8, Article 1857, DOI: 10.3390/s19081857.
39. Rojo F., Kizer E., Upadhyaya S. et al., A leaf monitoring system for continuous measurement of plant water status to assist in precision irrigation in grape and almond crops, *IFAC-PapersOnLine*, 2016, V. 49, No. 16, pp. 209–215, DOI: 10.1016/J.IFACOL.2016.10.039.
40. Scudiero E., Teatini P., Manoli G. et al., Workflow to establish time-specific zones in precision agriculture by spatiotemporal integration of plant and soil sensing data, *Agronomy*, 2018, V. 8, Iss. 11, Article 253, DOI: 10.3390/AGRONOMY8110253.
41. Serrano J., Shahidian S., Marques da Silva J. et al., Mapping management zones based on soil apparent electrical conductivity and remote sensing for implementation of variable rate irrigation—Case study of corn under a center pivot, *Water*, 2020, V. 12, Iss. 12, Article 3427, DOI: 10.3390/W12123427.
42. Singh R. K., Senay G. B., Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States, *Water*, 2016, V. 8, Iss. 1, Article 9, DOI: 10.3390/w8010009.
43. Smith R. J., Baillie J., McCarthy A. C., Raine S. R., Baillie C. P., *Review of precision irrigation technologies and their application*, National Centre for Engineering in Agriculture Publication 1003017/1, USQ, Toowoomba, 2010.
44. Song X., Zhang G., Liu F. et al., Modeling spatio-temporal distribution of soil moisture by deep learning-based cellular automata model, *J. Arid Land*, 2016, V. 8, Iss. 5, pp. 734–748, DOI: 10.1007/S40333-016-0049-0.
45. Tawalbeh Z., Bawazir A. S., Fernald A., Sabie R., Spatiotemporal variabilities in evapotranspiration of alfalfa: A case study using remote sensing METRIC and SSEBop models and eddy covariance, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, Iss. 13, Article 2290, DOI: 10.3390/rs16132290.
46. Vera J., Conejero W., Conesa M. R., Ruiz-Sánchez M. C., Irrigation factor approach based on soil water content: A nectarine orchard case study, *Water*, 2019, V. 11, Iss. 3, Article 589, DOI: 10.3390/w11030589.
47. Wang J., Li H., Zhang G. et al., Estimation of evapotranspiration for irrigated artificial grasslands in typical steppe areas using the metric model, *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, V. 17, No. 6, pp. 13759–13776, DOI: 10.15666/aeer/1706\_1375913776.
48. *Water for sustainable food and agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017, 33 p.
49. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Pchelkin V. V., 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, *Sensors*, 2023, V. 23, Iss. 5, Article 2601, DOI: 10.3390/s23052601.
50. Zeyliger A., Muzalevskiy K., Ermolaeva O. et al., Mapping soil surface moisture of an agrophytocenosis via a neural network based on synchronized radar and multispectral optoelectronic data of SENTINEL-1,2—Case study on test sites in the lower Volga region, *Sustainability*, 2024, V. 16, Iss. 21, Article 9606, DOI: 10.3390/su16219606.