# АГРОИНЖЕНЕРИЯ

Научная статья УДК 502/504: 631.432.2 doi: 10.28983/asj.y2022i4pp83-88

## Классификация и зонирование потоков суммарного испарения за вегетацию для территории Марксовского района Саратовской области, полученных по данным продукта MOD 16 ЕТ в 2003–2017 гг.

### Ольга Сергеевна Ермолаева, Анатолий Михайлович Зейлигер

ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия. e-mail: azeiliguer@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты классификации и зонирования потоков суммарного испарения за вегетацию ЕТаw на территории Марксовского района Саратовской области за вегетационные периоды 2003-2017 г. Расчеты по указанным видам пространственного анализа проведены в среде программного обеспечения ArcGIS Pro 2.8 с использованием инструментов пространственного анализа по ранее полученным пространственно-временным массивам ЕТаw. Для классификации потоков ЕТаw по типам землепользования были использованы маски растровых массивов данных для территории России, полученные в IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) в результате обработки и анализа данных космического мониторинга. Анализ результатов классификации для исследованной территории выявил значимую разницу потоков ЕТаw для различных типов землепользования. Для зонирования пространственных закономерностей формирования потоков ЕТаw по мере их удаленности от левого берега р. Волги были сформированы маски семи зон, расположенных на удалении от его кромки в пределах: 0-5 км; 5-10 км; 10-20 км; 20-30 км; 30-40 км; 40-50 км; 50-60 км. Проведенная фильтрация потоков ЕТаw внутри этих зон по типам землепользования позволила выявить уменьшение их значений по мере удаленности от левого берега р. Волги.

*Ключевые слова:* суммарное испарение; гидрология суши; космический мониторинг; продукт MOD16 ET; классификация; типы землепользования; зонирование; удаленность; р. Волга; Марксовский район.

Для цитирования: Ермолаева О. С., Зейлигер А. М. Классификация и зонирование потоков суммарного испарения за вегетацию для территории Марксовского района Саратовской области, полученных по данным продукта MOD 16 ЕТ в 2003– 2017 гг. // Аграрный научный журнал. 2022. № 4. С. 83–88. http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp83-88.

# AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

# Classification and zoning of total evaporation flows for vegetation for the territory of the Marksovsky district of the Saratov region obtained according to the product MOD 16 ET in 2003–2017

### Olga S. Ermolaeva, Anatoly M. Zeyliger

Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation azeiliguer@mail.ru.

*Abstract.* This paper presents the results of the classification and zoning of the evapotranspiration fluxes for the growing season ETaw in the Marksovsky district of the Saratov region for the growing seasons of 2003-2017. The calculations for these types of spatial analysis were carried out in the ArcGIS Pro 2.8 software environment using the previously obtained two spatial arrays ETaw. To classify ETaw flows by land use types, we used raster datasets obtained at IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) for the territory of Russia as a result of processing and analyzing space monitoring data. Analysis of the classification results for the study area revealed a significant difference in ETaw flows in areas occupied by different types of land use. For zoning ETaw flows by distance from the left bank of the Volga River, the boundaries of seven zones were built at distances from its edge: 0-5 km; 5-10 km; 10-20 km; 20-30 km; 30-40 km; 40-50 km; 50-60 km. For the territories located within the indicated zones, the filtration of two ETaw flows was carried out, which revealed a decrease in their values as they moved away from the left bank of the Volga River

*Keywords:* evaporation; land hydrology; remote sensing; MOD16 ET; classification; land use; zoning; remoteness; river Volga; Marksovsky district.

*For citation:* Ermolaeva O. S., Zeyliger A. M. Classification and zoning of total evaporation flows for vegetation for the territory of the Marksovsky district of the Saratov region obtained according to the product MOD 16 ET in 2003-2017 // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(4):83–88. (In Russ.). http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp83-88.

**Введение.** Повышение эффективности производства сельскохозяйственных культур является драйвером удовлетворения потребностей растущего населения Земли в продовольствии. Одним из ключевых лимитирующих факторов производства растительной продукции являются доступные агрофитоценозам запасы почвенной влаги в корнеобитаемом слое почвы в течение вегетационного периода. Для повышения эффективности использования этих запасов разрабатываются и применяются разнообразные технологии и методы, направленные с одной стороны на накопление почвенной влаги в корнеобитаемом слое почвенного покрова [2, 5], а с другой стороны – на ее эффективное использование [12]. Потоки суммарного испарения ЕТа, формирующиеся на границе между растительным покровом агрофитоценозов и приземным слоем атмосферы являются физической характеристикой расходования сельскохозяйственных растениями запасов почвенной влаги корнеобитаемого слоя почвы, отражающей их рост и развитие в



процессе вегетации. Региональные пространственно-временные паттерны этих потоков на сельских территориях во многом зависят от сложившихся характеристик ландшафтов и проявления погодных условий, а также антропогенного влияния, тесно связанного с землепользованием.

На региональном уровне при анализе эффективности земледелия и растениеводства, зачастую, возникают задачи по оценкам урожайности агроценозов. В ранее проведенных многочисленных исследованиях было показано, что величина потока суммарного испарения за вегетацию ЕТаw тесно связана с урожайностью биомассы для большинства зерновых и пропашных культур [6–9, 11]. В результате это позволяет использовать данные космического мониторинга потоков ЕТаw для дистанционной, объективной оценки урожайности отдельных агроценозов, а также эффективности использования ими запасов почвенной влаги в корнеобитаемом слое почвы, как в богарном, так и в орошаемом земледелии [12].

Для восполнения недостатка метеорологических данных мониторинга потоков ЕТа на территориях сельскохозяйственных регионов с редкой или отсутствующей сетью метеорологических наблюдений была разработана и апробирована методика [3], включающая сбор, обработку и анализ данных для расчета потоков ЕТаw на основе данных космического мониторинга земной поверхности спектрорадиометром MODIS с использованием модели SEBS [10]. В последующих работах [4] для анализа потоков ЕТа на территории Палласовского района Волгоградской области был использован продукт MOD16ET, который представляет собой осредненные значения этих потоков, рассчитываемых по модели SEBS на основе данных спектрорадиометра MODIS для 8-ми дневных периодов. В результате сравнения данных этого продукта с результатами расчетов суточных значений ЕТа для территории Марксовского района Саратовской области была показана возможность использования этого продукта для проведения пространственно-временного анализа [3]. В недавно опубликованной работе [1] были представлены результаты исследований по применению данных космического мониторинга на основе продукта MOD16ET для территории этого же района. Результаты расчетов по этой методике позволили идентифицировать на его территории в период 2003-2017 г. два полупериода флуктуаций суммарных за вегетацию потоков ЕТаw. Эти флуктуации имели негативную направленность в первую половину этого периода (2003-2010 г.) по всей территории данного района, а в его вторую половину (2010-2017 г.) – позитивную.

В настоящей работе приведены результаты дальнейшего развития метода пространственно-временного анализа наборов данных потоков ЕТаw, на основе данных космического мониторинга [1] с целью идентификации связей величин этих потоков с их местоположением, которое с одной стороны связано с соответствующим типом землепользования, а с другой стороны его удаленностью от уреза левого берега р. Волги.

Объект исследований. Марксовский район Саратовской области (площадь 2908 км<sup>2</sup>) расположен на левом берегу нижней части среднего течения р. Волги, в буферной зоне между р. Волгой и полупустынными территориями Казахстана. С географической точки зрения это расположение позиционирует этот район, как западную провинцию среднеазиатской пустынной зоны, относящуюся к зоне сухих степей с континентальным климатом, а также атмосферными и почвенными засухами, происходящими в летний вегетационный период. При этом, несмотря на сложные климатические условия Марковского района, более 67 % его территории используется для ведения пропашного земледелия, что характеризует аграрную направленность его экономики.

*Методика исследований*. Для проведения классификации и зонирования потоков суммарного испарения ЕТам за основную часть вегетации с 145-го календарного дня (25 мая) по 241-й день (2 сентября) были использованы сформированные массивы данных за 2003–2017 г. Слои этих массивов, соответствующие годам указанного временного ряда, представлены на рис. 1. Там же отображены границы разной удаленности от уреза левого берега р. Волги, расположенные на расстояниях: 1) зона 1 – 0–5 км; 2) зона 2 – 5–10 км; 3) зона 3 – 10–20 км; 4) зона 4 – 20–30 км; 5) зона 5 – 30–40 км; 6) зона 6 – 40–50 км; 7) зона 7 – 50–60 км.

Представленные на рис. 1 картограммы суммарных потоков ЕТаw отображены с использованием единой цветовой палитры, представленной соответствующей легендой (рис. 1, р). Визуальный анализ представленных на рис. 1 картограмм позволил выявить ряд паттерн потоков ЕТаw, отображенных на картограммах оттенками голубого и синего цвета в зависимости от значений этих потоков в каждый конкретный год исследованного временного ряда.

Первая паттерна расположена на северо-западной границе района, и простирается вдоль левого берега р. Волги, в пределах первой 5-километровой зоне удаленности от него. Потоки ETaw в этой паттерне имеют высокие и достаточно стабильные значения на протяжении всего исследованного периода.

Вторая паттерна расположена вдоль юго-западной границы района в границах третьей и четвертой зон, с удалением 10–30 км от р. Волги. Эта паттерна соответствует местам расположения дождевальных машин кругового действия, получающих воду из магистрального канала 1-й очереди Приволжской оросительной системы. Особенности отображения этой паттерны связаны с изменением на протяжении исследованного периода (2003–2017 гг.) ее очертаний, а также окраски. Обе эти особенности вызваны изменениями в инфраструктуре полей, где на протяжении рассмотренного периода велось орошение, а также с характеристиками сформированного на этих полях водного режима агрофитоценозов.

Третья паттерна расположена у южной границы в пределах границ пятой зоны с удалением 40 до 50 км от р. Волги. Местоположение этой паттерны совпадает с расположением группы орошаемых полей, получающих воду из магистрального канала 2-ой очереди Приволжской оросительной системы. Для этой паттерны в целом характерны те же особенности, что были отмечены и для второй.

Другие паттерны потоков ЕТаw при визуальном анализе не имеют необходимой однозначной идентификации, что вызвало необходимость проведения количественного анализа, идентифицировавших наличие паттерн, связанных с трендами изменения потоков ЕТаw в течение двух полупериодов (2003–2010 гг. и 2010–2017 гг.) [12].



Рис. 1. Картограммы пространственного распределения на территории Марковского района Саратовской области суммарных потоков ЕТаw за основную часть вегетации с 145-го календарного дня (25 мая) по 241-й день (2 сентября): a – 2003 г.; б – 2004 г.; в – 2005 г.; г – 2006 г.; д – 2007 г.; е – 2008 г.; ж – 2009 г.; з – 2010 г.; и – 2011 г.; к – 2012 г.; л – 2013 г.; м – 2014 г.; н – 2015 г.; о – 2016 г.; п – 2017 г.; р – легенда

На следующих этапах инструментального пространственно-временного анализа потоков ЕТаw была проведена их классификация по маскам видов землепользования, а также по маскам зон разной удаленности от левого берега р. Волги. Для первой из этих классификаций был использован растровый слой землепользования с пространственным разрешением 150 м, созданный в международном институте прикладных системных исследований IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) для территории РФ [13]. Из этого слоя данных землепользования с использовани-ем векторного слоя данных административных границ Марксовского района для него был получен слой землепользования с помощью соответствующих инструментов программного обеспечения ArcGIS Pro 2.8 (рис. 2).



Рис. 2. Картограммы видов землепользования на территории Марксовского района (по состоянию на 2005 г.): а) в границах района; б) в границах района и зон удаленности от р. Волги

Полученный растровый слой землепользования на территории Марксовского района включал 10 видов: 1) лесные угодья; 2) пахотные земли; 3) неиспользуемые пахотные земли; 4) другие сельскохозяйственные земли; 5) заболоченные земли; 6) редколесье; 7) пожарища; 8) природные пастбища; 9) кустарники; 10) водные объекты.

2022

В табл. 1 приведены значения долей площадей, занимаемых каждым видом землепользования на всей территории Марксовского района (зоны 1–7), а также на территориях каждой из зон разной удаленности от левого берега р. Волги. Для получения представленных в этой таблице данных к растровому слою видов землепользования района, и векторному слою границ зон разной удаленности от р. Волги были применены соответствующие инструменты ArcGIS Pro 2.8. Здесь же представлены значения долей площадей зон разной удаленности от площади всей территории Марксовского района.

Таблица 1

Характеристики	Jlec	Пахотные земли	Неиспользуемые земли	Другие сельско- хозяйственные земли	Заболоченные земли	Редколесье	Лесная гарь	Природные пастбища	Кустарники	Водные объекты	Доля в общей площади
Зона 1	25,17	13,34	6,67	25,55	2,90	0,04	0,34	0,64	0,72	23,85	12,71
Зона 2	4,23	61,13	2,43	29,60	0,08	0,00	0,04	0,13	0,08	2,26	11,42
Зона З	1,93	72,26	1,87	22,79	0,00	0,00	0,00	0,43	0,04	0,68	24,58
Зона 4	0,02	72,29	2,36	23,60	0,00	0,00	0,05	1,19	0,00	0,49	19,70
Зона 5	0,26	66,28	1,26	30,48	0,00	0,00	0,04	0,63	0,00	1,04	12,88
Зона б	0,00	58,13	2,78	36,03	0,00	0,00	0,07	2,57	0,00	0,42	13,61
Зона 7	0,56	76,87	2,43	18,16	0,00	0,00	0,37	1,31	0,00	0,28	5,11
Зоны 1–7	4,22	61,05	2,71	26,63	0,38	0,00	0,09	0,93	0,11	3,76	100

Доли площадей, %, отдельных видов землепользования на территории Марксовского района и каждой отдельной зоны с разной удаленностью от р. Волги

Результаты исследований. Результаты пространственной классификации потоков ЕТаw по типам землепользования для всей территории Марксовского района представлены на рис. 3. Диаграммы на этом рисунке, в графическом виде отображают профили ETaw, соответствующие разным видам землепользования. В целом эти профили имеют достаточно синхронную и устойчивую динамику, которая характеризуется ранжированным в течении всего периода проведенных исследований (2003-2017 г.) соответствующих разным типам землепользования величин потоков ЕТаw. Отмеченное ранжирование профилей ETaw по типам землепользования состоящее в устойчивом порядке чередования практически всех типов землепользования за исключением пахотных, а также неиспользуемых и других сельскохозяйственных земель.

В соответствии с отмеченным ранжированием профилей потоков ЕТаw, профиль территорий, покрытых лесом, имеет в течение всего исследуемого периода наибольшие значения среди всех видов землепользования, идентифицированных на территории Марксовского района. Следующие в порядке убывания значений потоков ЕТаw идут профили территорий, занятых кустарником и редколесьем, а также территории, на которых расположены поверхностные водные объекты. Вслед за ними идет группа профилей ЕТаw, соответствующих используемым и неиспользуемым пахотным землям, а также лесным гарям. Замыкает рассмотренную группу профиль территорий, занятых естественными пастбищами, который на протяжении всего периода 2003–2017 г. имел самые низкие значения потоков ETaw.

Отмеченное устойчивое квазисинхронное ранжирование профилей, соответствующих основным типам землепользования Марксовского района на протяжении рассмотренного периода, со всей очевидностью, является достаточно интересным и значимым научным результатом, вскрывшим важную закономерностью на региональном уровне. Очевидно, что это закономерность связана с пространственными характеристиками распределения растительного покрова, присущих рассмотренным типам землепользования, в частности их корневой системы, по территории Марксовского района. По-видимому, широкое сельскохозяйственное освоение территории Марковского района, связанное в основном с растениеводством, привело к ан-

2006

тропогенной трансформации его ландшафта и оказало влияние и на перераспределение потоков ЕТаw, фиксируемое в настоящее время. В результате такой трансформации наиболее удобные и плодородные земли оказались занятыми под пропашное земледелие, а неподходящие для механизированной обработки земли с невысоким бонитетом плодородия оказались, или в категории неиспользуемых земель, или естественных пастбищ, Последнее нашло свое отражение в соответствующем профиле с наименьшими значениями потока ЕТаw среди всех рассмотренных.

300 ETaw, [mm 200 100 едколесье Лес Песная гары Неиспользуемые паш Пастбища Другие Кустарник Болотные угодья Водные объе 0 2002 2004 2006 2008 2010 2012 2014 2016 В разрезе проводимого ис-Год

2008

Год

2010

2012

2014

2016

2018

400

300

200

100

0

2018

ETaw, [MN]

следования представляет инте-Рис. 3. Профили средних за вегетационные периоды 2003–2017 гг. потоков ЕТаw рес анализ не только синхронно-

86

АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

с территорий разных типов землепользования

2002

400

сти профилей потоков ЕТаw, но и значений т.н. относительных размахов этих профилей (нормированная на среднее разность максимальных и минимальных значений соответствующего ряда) по их принадлежности к разным типам землепользования. Эти размахи с территорий, занятых лесом и кустарником составляют 25–30 %. Эти же размахи для территорий, занятых редколесьем и водными объектами, составляют 40–60 %. В случае территорий, отнесенных к пашне, а также неиспользуемым и другим сельскохозяйственным землям значения соответствующих размахов составляют 75–80 %. В случае же территорий, отнесенных к лугам, значения размахов достигает уже 90 %.

Сопоставление полученных величин размахов профилей потоков ЕТаw свидетельствуют о значительно более устойчивой реакции природных экосистем, присущих элементам ландшафта с более глубокой корневой системой, на флуктуации погодных условий, в противоположность антропогенным экосистемам, к которым относится пашня, неиспользуемые и другие сельскохозяйственные земли, а также природные пастбища.

На заключительном этапе пространственно-временного анализа профилей потоков ЕТаw было проведено сопоставление профилей с близкими значениями этих потоков, синхронность которых в рассмотренный период нарушалась, и которые соответствовали пахотным землям, а также неиспользуемым и другим сельскохозяйственным землям. По всей видимости, первое значимое обстоятельство, которое могло способствовать нарушению синхронности соответствующих профилей в 2003-2017 гг., может быть объяснено переходом территорий, соответствующих этим типам землепользования из одного типа в другой. В то же самое время необходимо учитывать, что территории этих типов землепользования распределены по зонам с разной удаленностью от р. Волги, что могло оказать влияние на формирование различного водного режима корнеобитаемого слоя почвы в результате неодинакового распределения выпавших там осадков.

Дополнительно необходимо отметить, что площадь территорий, классифицированных как неиспользуемая пашня и лесная гарь, имеют существенно меньшие значения в сравнении с территорией под пашней. Таким образом, изменение землепользования на этих территориях, а также пространственная неоднородность выпадения осадков могли привести к более значимым флуктуациям потоков ЕТаw в сравнении с территориями, занятыми под пашню, площадь территории которых является наибольшей среди всех типов землепользования во всех зонах с разной удаленностью от р. Волги.

В развитие анализа профилей потоков ETaw, рассчитанных для всей территории Марковского района, было проведено зонирование этих потоков с территорий занятых пашней. На рис. 4 представлены профили средне площадных потоков ETaw с территорий, занятых под пашни, в пределах каждой из этих семи зон.

Результаты зонирования потоков ЕТаw с территорий, занятых пашней, во всех 7-ми зонах с разной удаленностью, свидетельствуют о наличии устойчивого уменьшения этих потоков по мере удаления этих зон от левого берега р. Волги. Одной из причин выявленной особенности может являться градиентно направленная дифференциация дождевых осадков в теплый период года, что подтверждается результатами анализа дифференциации трендов ЕТаw, представленных ранее [1]. В итоге, точно также, как и в случае сопоставления профилей потоков ЕТаw с территорий, занятых разными типами землепользования, зональные профили этих же потоков с пахотных земель также имеют характерную синхронность и устойчивость. Это позволило провести объединение профилей в две группы в соответствии с ранжированием их значений в порядке убывания. В первую группу были включены профили зон с 1-й по 4-ю, а во вторую с 5-й по 7-ю. Анализ профилей ЕТаw внутри созданных двух групп показал имеющую место волатильность при ранжировании

100

50

2018



значений этих потоков в 2003-2017 гг. Так если в первой группе в начале этого периода порядок чередования (ранжирования) профилей в соответствии со значениями потоков ETaw соответствовал в целом их порядковым номерам (за некоторым исключением 1-й и 2-й зон), то к концу рассмотренного периода порядок этого чередования кардинальным образом изменился, на практически противоположный. При этом изменение отмеченного чередования достаточно сложно объяснить только лишь такими факторами, как выпадение осадков, поскольку указанное изменение чередования приняло достаточно устойчивый характер на протяжении последних 4-5 лет рассмотренного периода.

Заключение. Полученные результаты пространственно-временной дифференциации потоков суммарного испарения за вегетацию ЕТаw по территории Марксовского района Саратовской области тесно связаны с типами землепользования, а также с удаленностью от берега р. Волги.

Одно из обстоятельств, приводящее к дифференциации потоков ETaw по типам землепользования, очевидно, связано с различной глубиной корнеоб-

кой области тесно илепользования, а ит берега р. Волги. ельств, приводяи потоков ЕТаw





2010

Год

2012

2014

2016

2004

100

50

2002

Зона 1 (0-5 км)

Зона 2 (5-10 км)

Зона 3 (10-20 км) Зона 4 (20-30 км)

Зона 5 (30-40 км)

Зона 6 (40-50 км)

Зона 7 (50-60 км)

2008

2006

итаемого слоя почвенного покрова, в котором формируются влагозапасы, доступные для водопотребления соответствующих этим видам землепользования растительными покровами.

Одно из обстоятельств, приводящее к дифференциации потоков ETaw по зонам с разной удаленностью от берега р, Волги, по всей видимости, может быть связано с уменьшением норм дождевых осадков в период вегетации по мере их удаления от этой границы.

*Благодарности. Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ* 19-29-05261 мк «Картографическое моделирование влагозапасов почвенного покрова на основе комплексной геофизической влагометрии для целей цифрового орошаемого земледелия».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолаева О. С., Зейлигер А.М. Анализ трендов потоков суммарного испарения (за 2003-2017 гг.) по данным продукта МОD16А2 для территории Марксовского района Саратовской области // Природообустройство. 2021. № 2. С. 16–25.

2. Зейлигер А. М. Точное (дифференцированное) орошаемое земледелие - технология повышения эффективности орошения и снижения нагрузки на окружающую среду // Сборник научных докладов ВИМ. 2010. Т. 2. С. 633–638.

3. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. 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: сб. статей: в 2- т. / Институт аридных зон, Южный научный центр РАН, Южный федеральный университет. Ростов н/Д., 2016. С. 258–273.

4. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С., Кричевцова А. Н. Результаты пространственно-временного анализа наборов данных Д33 по испарению с поверхности суши MOD16 et за 2000–2009 годы для территории Палласовского района Волгоградской области РФ // Экология. Экономика. Информатика: сб. статей: в 3 т. / Российский фонд фундаментальных исследований, Южный федеральный университет, Институт математики, механики и компьютерных наук имени Воровича И.И., Институт аридных зон, Южный научный центр Российской академии наук. Ростов н/Д., 2015. С. 35–48.

5. Зейлигер А.М., Фартуков В. А., Косицын А. В. Результаты полевых экспериментов по тестированию технологии дифференцированного дождевания посевов сельскохозяйственных культур // Сб. науч. докладов ВИМ. 2012. Т. 2. С. 430–434.

6. Bennett, D.R.; Harms, T.E. Crop Yield and Water Requirement Relationships for Major Irrigated Crops in Southern Alberta. Can. // Water Resour. J. Rev. Can. Resource. Hydr., 2011.Vol. 36. P.159–170.

7. Doorenbos J., Kassam A.H. Yield response to water. In FAO Irrigation and Drainage, Paper 33; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy. 1979. 193 p.

 Howell T.A. Relationships between crop production and transpiration, evapotranspiration, and irrigation. In Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy Monograph No. 30; Stewart, B.A., Nielsen, D.R., Eds.; American Society of Agronomy: Madison, WI, USA, 1990. P. 391–434.
Stewart J., Hagan R.M. Functions to Predict Effects of Crop Water Deficits. // J. Irrig. Drain. Div. 1973. Vol. 99. P. 421–439.

10. Su, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent Heat Fluxes. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2002. Vol. 6, P. 85–99. 11. Vaux H., Pruitt W.O. Crop-Water Production Functions. Adv. Irrig., 1983. Vol.2. P.61–97.

12. Zeyliger A.M., Ermolaeva O.S. Water stress regime of irrigated crops based on remote sensing and ground-based data // Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 6.

13. CD-ROM Land Resources of Russia [Electronic resource]. URL: https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia\_cd/index. htm (accessed: 14.10.2021).

#### REFERENCES

1. Ermolaeva O.S., Zeyliger A.M. Analysis of evapotranspiration flux trends (for 2003-2017) according to the MOD16A2 product data for the territory of the Marksovsky district of the Saratov region. *Nature Engineering*. 2021; 2: 16–25.

2. Zeiliger A. M. Accurate (differentiated) irrigated farming - a technology for increasing irrigation efficiency and reducing the environmental load. *Collection of scientific reports of VIM*. 2010; 2: 633–638.

3. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S. Results of computer modeling of water stress in irrigated alfalfa crops according to ground-based meteorological and space monitoring of the temperature of the underlying layer using the FAO-56 method and the SEBS model. *Ecology. Economy. Informatics.* Rostov on Don, 2016: 258–273.

4. Zeiliger A. M., Ermolaeva O. S., Krichevtsova A. N. Results of spatial-temporal analysis of remote sensing data sets on evaporation from the land surface MOD16 et for 2000-2009 for the territory of the Pallasovsky district of the Volgograd region of the Russian Federation. *Ecology. Economy. Informatics.* Rostov on Don, 2015: 35–48.

5. Zeiliger A.M., Fartukov V.A., and Kositsyn A.V., Results of field experiments on testing the technology of differentiated sprinkling of agricultural crops. *Collection of scientific reports of VIM*. 2012; 2: 430–434.

6. Bennett, D.R.; Harms, T.E. Crop Yield and Water Requirement Relationships for Major Irri-gated Crops in Southern Alberta. Can. *Water resources. J. Rev. Can. resource. Hydro.*, 2011; 36: 159–170.

7. Doorenbos J., Kassam A.H. Yield response to water. In FAO Irrigation and Drainage, Paper 33; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy. 1979. 193 p.

8. Howell T.A. Relationships between crop production and transpiration, evapotranspiration, and irrigation. In Irrigation of Agricultural Crops. Agronomy Monograph No. thirty; Stewart, B.A., Nielsen, D.R., Eds.; American Society of Agronomy: Madison, WI, USA, 1990, pp. 391–434.

9. Stewart J., Hagan R.M. Functions to Predict Effects of Crop Water Deficits. J. Irrig. Drain. Div. 1973; 99: 421-439.

10. Su, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent Heat Fluxes. *Hydrol. Earth Syst. sci.* 2002; 6: 85–99. 11. Vaux H., Pruitt W.O. Crop-Water Production Functions. *Adv. Irrig.* 1983; 2: 61–97.

12. Zeyliger A.M., Ermolaeva O.S. Water stress regime of irrigated crops based on remote sensing and ground-based data. *Agronomy*. 2021; 11: 6.

13. CD-ROM Land Resources of Russia [Electronic resource]. URL: https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia\_cd/index. htm (accessed: 10/14/2021).

Статья поступила в редакцию 11.01.2022; одобрена после рецензирования 22.02.2022; принята к публикации 28.02.2022. The article was submitted 11.01.2022; approved after reviewing 22.02.2022; accepted for publication 28.02.2022.

2022

АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ