

**Критерии авторства**

Зверков М.С., Брыль С.В. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Зверков М.С., Брыль С.В. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 23.02.2021 г.

Одобрена после рецензирования 22.03.2021 г.

Принята к публикации 5.04.2021 г.

**Criteria of authorship**

Zverkov M.S., Bryl S.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Zverkov M.S., Bryl S.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

**Conflict of interests**

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 23.02.2021

Approved after reviewing 22.03.2021

Accepted for publication 5.04.2021

Оригинальная статья

УДК 502/504: 631.432.2

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-16-25

## **АНАЛИЗ ТРЕНДОВ ПОТОКОВ СУММАРНОГО ИСПАРЕНИЯ (ЗА 2003-2017 ГГ.) ПО ДАННЫМ ПРОДУКТА MOD16A2 ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ МАРКОВСКОГО РАЙОНА САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

**ЕРМОЛАЕВА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА** <sup>✉</sup>, старший преподаватель  
ol\_ermolaeva@mail.ru

**ЗЕЙЛИГЕР АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ**, д-р биологических наук, профессор  
azeiliger@mail.ru

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

*В настоящей работе представлены результаты расчетов площадных трендов потоков суммарного испарения  $E_{Ta}$  за вегетационные периоды 2003-2017 гг. на территории Марковского района Саратовской области. Сформированные для этой территории растровые слои с 500 м разрешением значений потоков  $E_{Ta8}$  (8-суточного осреднения  $E_{Ta}$ ) для каждого года исследованного временного интервала были получены из наборов тайлов  $h20v03$  продукта MOD16A2 за период с 25 мая по 2 сентября соответствующего года. В результате для территории Марковского района было составлено 19830 временных рядов потоков суммарного испарения за вегетационные периоды  $E_{Taw}$  15 лет исследуемого периода. Составленные временные ряды были использованы для проведения пространственного анализа трендов  $E_{Taw}$  с применением метода непараметрической статистики Манн-Кендалла. В результате этого анализа было выявлено наличие двух полупериодов с диаметрально противоположными направлениями трендов у доминирующей части временных рядов. Первый полупериод – с отрицательными значениями трендов – пришелся на 2003-2010 гг., а второй – с положительными значениями трендов – приходился на 2010-2017 гг. Для визуального дешифрирования мест аномальных значений скоростей трендов обоих полупериодов были использованы космоснимки высокого разрешения. В результате было отмечено, что месторасположение этих аномалий соответствовало месторасположению дождевальными машин кругового действия на территории Приволжской оросительной системы.*

**Ключевые слова:** суммарное испарение, модель SEBS, продукт MOD16A2, тест Манн-Кендалла, Марковский район, дождевальные машины, Приволжская оросительная система

**Формат цитирования:** Ермолаева О.С., Зейлигер А.М. Анализ трендов потоков суммарного испарения (за 2003-2017 гг.) по данным продукта MOD16A2 для территории

Марковского района Саратовской области // Природообустройство. – 2021. – № 2. – С. 16-25. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-16-25.

© Ермолаева О.С., Зейлигер А.М., 2021

Original article

## ANALYSIS OF TRENDS OF TOTAL EVAPORATION FLUXES (FOR 2003-2017) ACCORDING TO THE DATA OF PRODUCT MOD16A2 FOR THE TERRITORY OF THE MARKOVSKY DISTRICT OF THE SARATOV REGION

*ERMOLAEVA OLGA SERGEEVNA, senior lecturer*

ol\_ermolaeva@mail.ru

*ZEYLIGER ANATOLY MIKHAILOVICH, d-r of biological sciences, professor*

azeiliger@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya, 49, Russia

*This paper presents the results of calculations of areal trends of total evaporation ETa fluxes for the growing periods of 2003-2017 in the territory of the Markovskiy district of the Saratov region. Raster layers formed for the territory with a 500 m resolution of the Eta8 (Eta 8-day averaging) for each year of the investigated time interval were obtained from tiles sets h20v03 of the product MOD16A2 for the period from May 25 to September 2 of the corresponding year. As a result, the 19830 time series of total evaporation fluxes for the ETaw growing seasons of the 15-year study period were drawn up for the Markovskiy district. The obtained time series of geodata of the actual evapotranspiration for the growing season ETaw for each of the 15 studied years were used for the spatial analysis of ETaw trends. For the analysis, the method of nonparametric Mann-Kendall statistics was used. It revealed the presence of 2 half-periods with diametrically opposite trends in the dominant part of time series. The first half-period found out negative values (downward) trends and falls on 2003-2010, the second half-period showed positive (upward) trends for 2010-2017. The presented results of the spatial distribution of both trends indicate the presence of an influence on ETaw both distance from the bank of R. Volga and anthropogenic factors. Hypotheses for additional analysis are proposed. For the visual deciphering of the places of abnormal values of trends velocities of the both half-periods there were used space photos of high resolution. As a result it was marked that the location of these anomalies corresponded to the location of pivot sprinklers in the territory of the Privolzhskoj irrigation system.*

**Keywords:** total evaporation, SEBS model, product MOD16A2, Mann-Kendall test, Markovskiy district, sprinklers, Privolzhskaya irrigation system

**Format of citation:** 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 Markovskiy district of the Saratov region // Prirodobustrojstvo. – 2021. – № 2. – S. 16-25. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-16-25.

**Введение.** На значительной части юга Европейской части России доступность почвенной влаги в корнеобитаемом слое почвенного покрова сельских территорий существенно связана с влагозапасами, формируемыми в результате баланса приходных (осадки, снеготаяние, орошение) и расходных (суммарное испарение, потоки внутри почвенно-грунтового покрова) статей. При этом расходование влагозапасов на сельских территориях в период

вегетации контролируется, помимо метеорологических параметров, и антропогенными воздействиями, формируемыми в процессе сельскохозяйственной деятельности.

Зависимость производства сельскохозяйственной продукции от возможных угроз изменения климата вызывает необходимость анализа их влияния на доступность влагозапасов корнеобитаемого слоя почвенного покрова для сельскохозяйственных посевов [1-5], а также на развитие неблагоприятных процессов

деградации и опустынивания сельскохозяйственных земель [6], которые в свою очередь влияют на биологическую продуктивность, зависящую, в том числе и от применяемых методов и технологий ведения богарного и орошаемого земледелия. В связи с этим в работе основное внимание уделено пространственно-временному анализу потоков суммарного испарения с земной поверхности сельских территорий, являющихся индикаторами протекания на них процессов вегетации фитоценозов [1, 6].

Традиционные методы оценок потоков потенциального и фактического суммарного испарения (соответственно ET и ETa) основаны на использовании данных наземного агрометеорологического мониторинга, включающего в себя метеорологические характеристики приземного слоя атмосферы, а также характеристики растительного и почвенного покрова. Эти методы позволяют получать соответствующие оценки ET и ETa с высокой достоверностью для относительно небольших по площади участков локального уровня. Для покрытия такими оценками значительных по площади территорий на региональном уровне требуется достаточно густая сеть агрометеорологических станций. Высокие издержки на функционирование таких сетей делают их практическое использование неэффективным.

В последние два десятилетия активно развиваются методы оценки ET и ETa, основанные на использовании результатов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Эти методы позволяют получать с высокой периодичностью растровые покрытия оценок потоков ET и ETa низкого, среднего и высокого пространственного разрешения. Пространственное разрешение этих покрытий, а также их повторяемость зависят от характеристик съемочной аппаратуры и орбит космических платформ, на которых размещается соответствующая аппаратура. При этом покрытия низкого разрешения с размерами пикселей порядка нескольких километров и высокой периодичности порядка часов используются в моделях регионального уровня [1, 7]. В свою очередь, покрытия высокого разрешения с размерами пикселей порядка десятков метров и повторяемостью порядка двух недель используются в основном в задачах экологического мониторинга локального уровня [4, 8, 9].

В настоящее время на региональном уровне наиболее востребованными являются покрытия среднего разрешения. Эти

покрытия с размерами пикселей порядка сотен метров и суточной повторяемостью используются при мониторинге сельских территорий для решения разнообразных задач анализа и контроля процессов включая оперативное управление орошением посевов сельскохозяйственных культур [6, 7, 8, 10, 11]. Так, ранее авторами были проведены исследования по использованию данных спектро-радиометра MODIS (продукт MOD16A2) для оценки водного стресса орошаемых посевов сельскохозяйственных культур, а также оценки эффективности орошения [12]. Этот продукт представляет собой коллекцию тайлов растровых значений восьмисуточных потоков суммарного испарения (ETa8). Эти тайлы формируют непрерывное покрытие территории земной суши между 80° с.ш. и 60° ю.ш. на каждый из 43-х восьмисуточных периодов календарного года. Наполнение этих тайлов рассчитывается по компьютерному коду модели SEBS [13], основанной на уравнении Пенмана-Монтейта, с использованием данных спектро-радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), размещенного на космической платформе Terra.

Достоверность продукта MOD16A2 была оценена в ходе непрерывного мониторинга в период 2000-2010 гг. на сетях наземных кроссвариационных потоковых станций. По итогам сравнения данных наземного мониторинга с результатами расчетов по модели SEBS были оценены сезонные расхождения для разных физико-географических зон [13]. Для территории Марковского района эти расхождения лежат в пределах 5-10%, что сделало приемлемым использование продукта MOD16A2 для проведения реализованных исследований.

Поступательное развитие технологий ДЗЗ и их применение государственными космическими агентствами ряда стран, а также частными фирмами приводят к формированию больших массивов пространственных данных космического мониторинга за длительные периоды. Пространственно-временной анализ этих массивов позволяет выявлять тенденции в протекании процессов и явлений, связанных с природными и антропогенными воздействиями на окружающую среду. В частности, анализ потоков ETa позволяет идентифицировать и локализовать тенденции, связанные с флуктуациями метеорологических характеристик [4, 8, 9], а также идентифицировать соответствующие последствия их проявления [6, 14].

Например, такой анализ был проведен ранее для территории Палласовского района Волгоградской области, расположенного южнее на 300-350 км Марковского района, на левом берегу нижнего течения р. Волги [15].

**Объект исследований.** Марковский район Саратовской области с площадью 2908 км<sup>2</sup> расположен на левом берегу Нижней Волги. В соответствии с ботанико-географическим районированием расположение района относится к западной провинции среднеазиатской пустынной зоны, а по классификации ФАО – к зоне высокого риска деградации земель.

Экономика Марковского района в целом характеризуется аграрной направленностью, основанной на использовании земельных ресурсов для ведения богарного и орошаемого земледелия, суммарная площадь которых составляет порядка 67% от общей площади района.

На территории Марковского района функционирует лишь одна метеорологическая станция системы Росгидромета, которая расположена в г. Маркс. Однако такое ее расположение на незначительном удалении от берега р. Волги не позволяет использовать получаемые на ней результаты мониторинга для их регионализации по всей территории Марковского района. Это связано в первую очередь с его географическим местонахождением в буферной зоне между р. Волгой и полупустынями Казахстана. В связи с этим для характеристики климатических данных ряда территорий были привлечены соответствующие источники, согласно которым отмечается достаточно хорошо выраженная пространственная вариация территории Марковского района.

Согласно этим источникам среднесуточная температура воздуха на территории Марковского района наиболее теплого месяца (июля) находятся в пределах от 22,6 до 22,7°C, а среднесуточная температура наиболее холодного месяца (января) – в пределах от –11,3 до –12,6°C. При этом среднегодовая температура воздуха на севере этого района оценивается значением порядка 5°C, а на юго-востоке – порядка 8°C. Аналогичная дифференциация прослеживается и по величинам среднегодового слоя осадков. Так, на севере района они находятся в пределах 450-500 мм, а на юго-востоке – в пределах 350-390 мм. Величины потенциального испарения лежат в пределах 780-920 мм, а фактического суммарного испарения – в пределах

300-470 мм [16]. Суммы активных температур за вегетационный период на севере варьируются в пределах 2600-2700°C и в пределах 2800-2900°C на – юго-востоке. В целом приведенные метеорологические характеристики свидетельствуют о полузасушливом теплом характере климата рассматриваемого района.

#### **Материалы и методы исследований.**

Для получения исходных данных, необходимых в целях проведения пространственно-временного анализа потоков ЕТа на территории Марковского района в вегетационные периоды в течение 2003-2017 гг., были использованы тайлы геоданных ЕТа8 продукта MOD16A2. Для этого был выбран единый временной интервал с 145 дня (25 мая) по 241 день (2 сентября) календарного года. В целом этот интервал соответствует среднемулетним датам начала и окончания поливного периода на оросительных системах Марковского района, а также на оросительных системах, расположенных вблизи его южной границы на территории Энгельского района Саратовской области. Дополнительным основанием для указанного выбора послужили результаты ранее проведенного многолетнего полевого мониторинга влагозапасов корнеобитаемого слоя [17]. Согласно этим результатам начало выбранного периода в целом соответствует моменту исчерпания влагозапасов корнеобитаемой зоны почвенного покрова, сформированных на землях сельскохозяйственного использования на территории Марковского района в результате снеготаяния и весенних дождевых осадков.

На первом этапе подготовки исходных данных для пространственно-временного анализа была сформирована и наполнена файловая база геоданных нижнего уровня обработки. Для этого на веб-сервисе Earth Explorer геологической службы США [18] были сформированы запросы на получение необходимых тайлов геоданных ЕТа8 для всех 15 лет – с 2003 по 2017 гг., соответствующих территории внутри административных границ Марковского района. В результате 180 временных тайлов (12 восьми суточных тайлов за 15 лет) значений потоков ЕТа8 были загружены в заранее созданную файловую базу геоданных.

На втором этапе был проведен перевод геоданных значений потоков ЕТа8 нижнего уровня в базу геоданных. Для этого на платформе программного обеспечения ArcGIS10.4 была разработана специализированная компьютерная модель, позволившая автоматизировать все необходимые и крайне трудоемкие

рабочие процессы. Для этого по маске (пространственному шаблону) административных границ Марковского района из загруженных тайлов продукта MOD16-ET было проведено вырезание массивов ETa8. В результате было получено 180 слоев геоданных, каждый из которых содержал 20886 пикселей, лежащих внутри указанных границ. После этого из данных массивов в соответствии с кодами метаданных были удалены пиксели, приходящиеся на поверхностные водные объекты, населенные пункты и пр. [13]. Итогом этого этапа стало формирование 180 растровых слоев геоданных ETa8, каждый из которых содержал 19830 пикселей, приходящихся

на земли сельскохозяйственного использования, а также земли лесного и других фондов Марковского района. В целом общий объем значений ETa8, подготовленных для анализа, соответствовал 3569400 пикселям.

На третьем этапе для всех 19830 пикселей каждого года, включенного в анализ, были сформированы массивы геоданных потоков суммарного испарения в выбранных границах вегетационного периода ETaw. На рисунке 1 представлено графическое отображение распределения всех 19830 пикселей значений потоков ETaw всех исследованных лет, ранжированных по 25 группам.

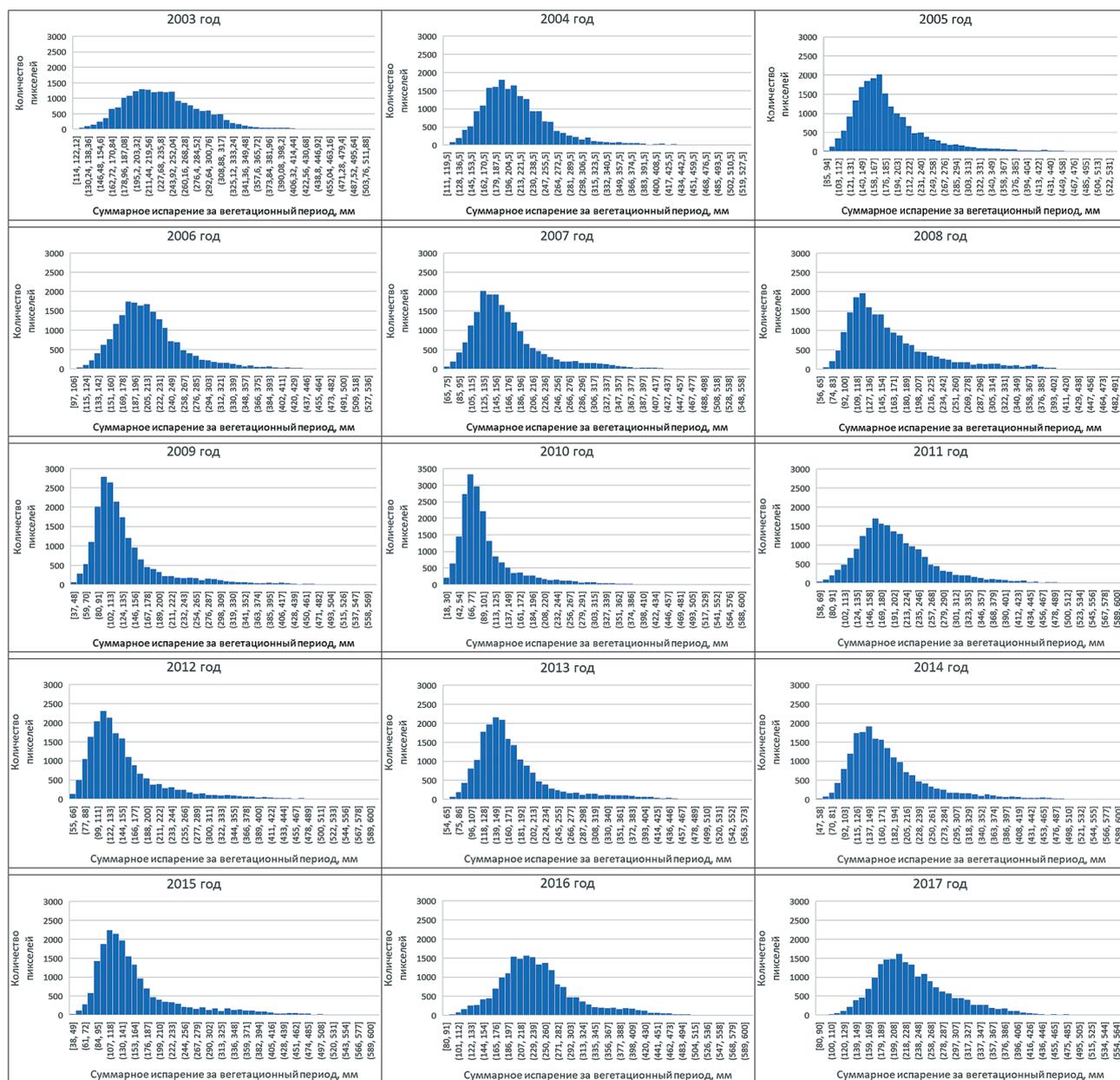


Рис. 1. Ранжированное по 25 группам представление количества пикселей суммарного испарения за вегетационный период ETaw, включенных в анализ  
Fig. 1. Ranked by 25 groups representation of the number of pixels of total evaporation during the ETaw growing season included in the years analysis

Представленные на рисунке 1 данные свидетельствуют о значительной статистической вариации значений потоков  $ET_{aw}$  каждого отдельного исследованного года, а также о наличии нескольких групп лет со схожим видом приведенных функций распределения. По-видимому, это может быть результатом схожего характера выпадения осадков в соответствующие годы. Однако ввиду отсутствия данных необходимый анализ проведен не был.

На четвертом, заключительном этапе, был проведен расчет трендов потоков  $ET_{aw}$ . Для этого сформированные массивы геоданных  $ET_{aw}$  были переведены в формат *xlsx*, а затем из них было сгенерировано 19830 временных рядов, каждый из которых содержал 15 членов со значениями  $ET_{aw}$  соответствующего года. По результатам проведенного анализа средних значений  $ET_{aw}$  всех 19830 пикселей эти ряды были разделены на две группы. Первая группа включала

в себя ряды за период с 2003 по 2010 гг., который характеризовался нисходящими величинами средних значений  $ET_{aw}$ , а вторая группа, которая характеризовалась восходящими величинами средних значений  $ET_{aw}$ , включала в себя ряды с 2010 по 2017 гг.

Все ряды обеих групп были исследованы на стационарность, в результате чего было показано, что практически все ряды, за редким исключением, соответствовали условию стационарности. После анализа ряды, удовлетворяющие условию стационарности, были протестированы на наличие монотонного однонаправленного тренда. Для этого был использован VBA-модуль, разработанный в среде MS Excel, реализующий непараметрический модифицированный тест Манна-Кендалла [3]. Картографическое отображение полученных результатов пространственно-временного анализа, реализованное в среде ArcGIS10.4, представлено на рисунке 2.

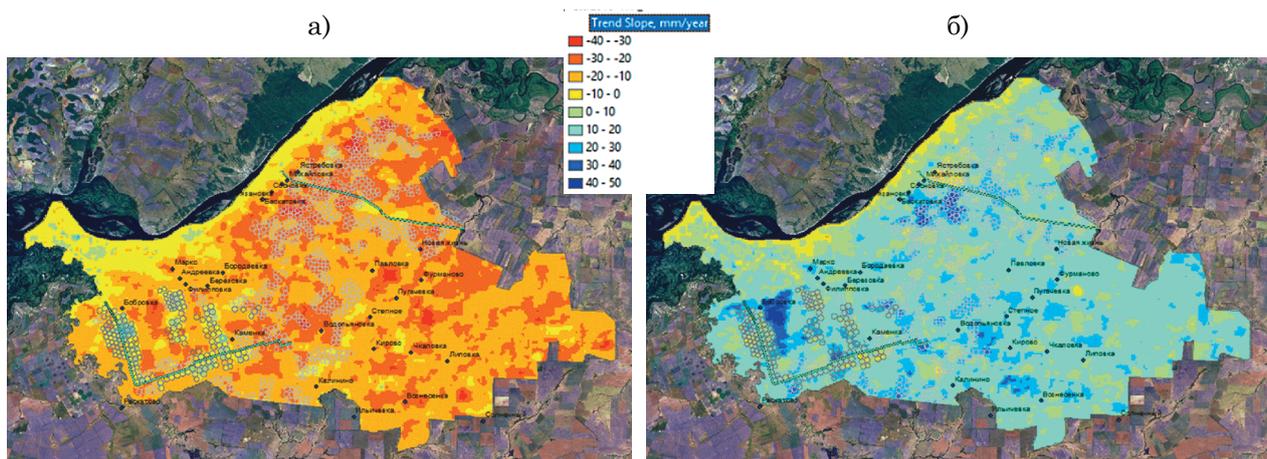


Рис. 2. Совмещенные картограммы контуров дождевальных машин кругового действия и трендов  $ET_{aw}$  двух полу периодов:

а) 2003-2010 гг.; б) 2010-2017 гг.

Fig. 2. Matched cartograms of the contours of pivot sprinklers and  $ET_{aw}$  trends of two half periods:

а) 2003-2010; б) 2010-2017

**Результаты и обсуждение.** В результате проведенного пространственно-временного анализа массивов геоданных  $ET_{aw}$  для территории Марковского района за период 2003-2017 гг. было выявлено наличие у доминирующего числа пикселей двух полу периодов с диаметрально противоположными направлениями трендов (рис. 2). Первый из этих полу периодов (с доминирующим нисходящими трендами) приходится на 2003-2010 гг., а второй (с положительными доминирующими трендами) – на 2010-2017 гг.

В первый полу период 2003-2010 гг., который характеризуется доминирующими отрицательными трендами  $ET_{aw}$  (рис. 2 а), взаимное расположение пикселей разной интенсивности находит свое отражение в формировании паттерн со схожими отрицательными значениями скоростей трендов. Так, в прибрежной части р. Волги эти скорости варьируют в пределах  $0 \div -10$  мм/год. В то же самое время в центральной и восточной частях Марковского района диапазон скоростей лежит в пределах  $-20 \div -30$  мм/год.

Во втором полупериоде 2010-2017 гг., который характеризуется доминирующими положительными трендами ETaw (рис. 2 б), имеет место схожее формирование паттерн, но уже с положительными значениями скоростей трендов. Так, для большей части центральной зоны эти скорости лежат в пределах 10-20 мм/год. При этом в узкой прибрежной полосе вдоль р. Волги, а также в центральной и восточной частях исследованного района расположены паттерны с близкими к нулю или даже с отрицательными скоростями трендов.

Примечательно, что на обеих картограммах, представленных на рисунке 2, выделяются аномальные контуры со значениями скоростей трендов ETaw, значительно отличающихся от окружающих их областей. Для дополнительного анализа причин, вызвавших формирование такого рода аномалии, были привлечены космоснимки высокого разрешения за 2011 г. В результате проведенного визуального дешифрирования снимков в местах сформированных аномалий были выявлены геометрические объекты кругообразной формы. Эти объекты были идентифицированы как территории, обслуживаемые дождевальными машинами (ДМ) кругового действия, расположенные на территории первой очереди Приволжской ОС.

Границы идентифицированных контуров ДМ были оцифрованы и помещены в качестве верхнего графического векторного слоя над растрами картограмм трендов ETaw (рис. 2). В результате сопоставления геоданных слоя контуров ДМ с растровыми слоями картограмм трендов обоих полупериодов было выявлено, что идентифицированные контуры со скоростями трендов значимо отличающихся от соседних, попадают внутрь соответствующих оцифрованных по космоснимкам границ ДМ.

Анализ значений трендов ETaw внутри указанных контуров ДМ, соответствующих первому полупериоду, показал, что они имеют в целом, пусть и небольшие, но все же положительные значения в отличие от соседних с ними областей, имевших значимые отрицательные значения этого показателя. В связи с этим предположим, что отмеченный факт может являться результатом последовательно проводимой оптимизации ведения орошаемого земледелия в целях повышения его эффективности. В итоге это привело к постепенному росту суммарного испарения, который нашел свое отражение в положительных значениях тренда ETaw соответствующих пикселей.

Анализ значений трендов ETaw внутри тех же контуров ДМ во второй период привел к получению в целом сходной пространственной картины, но с противоположной направленностью самих трендов. Однако в этом случае внутри контуров ДМ были выявлены три основных вида паттерн отрицательными, близкими к нулю и положительными значениями скоростей трендов. По-видимому, это является следствием, соответственно, ухудшения, стабилизации и улучшения ведения орошаемого земледелия внутри контуров полей, обслуживаемых ДМ.

Дополнительный анализ был проведен для местоположения сформированного аномального контура треугольной формы с высокими положительными значениями трендов, расположенного в непосредственной близости от ранее идентифицированных ДМ. Для этого были использованы более поздние космоснимки высокого разрешения за 2013-2017 гг. Дешифрирование этих космоснимков в месте расположения указанного контура выявило, что на территории данного аномального контура в тот период происходило постепенное наращивание установленных там ДМ на месте ликвидированных в конце предыдущего столетия [19]. В результате была подтверждена гипотеза антропогенного воздействия на резкое увеличение суммарного испарения в результате возобновления орошения с помощью этих ДМ, что привело к увеличению потоков суммарного испарения, которое нашло свое отражение в высоких положительных значениях скоростей тренда во второй полупериод проведенного пространственно-временного анализа.

### Выводы

Разработанный метод пространственно-временного анализа данных продукта MODIS16A2 позволил получить значимые результаты пространственного распределения значений трендов потоков суммарного испарения за вегетационные периоды ETaw 2003-2017 гг. на территории Марковского района Саратовской области. В результате анализа было выявлено наличие двух полупериодов с диаметрально противоположной направленностью трендов. Первый из этих полупериодов (2003-2010 гг.) характеризуется доминирующим отрицательным трендом потока суммарного испарения, в то время как второй (2010-2017 гг.) – доминирующим положительным трендом.

В результате проведенного дешифрирования космоснимков 2011-2017 гг. высокого разрешения были оцифрованы границы дождевальных машин кругового действия, расположенные на территории Приволжской оросительной системы. Последовательный анализ этих космоснимков показал, что значительная часть этих дождевальных машин функционировала на протяжении всего рассмотренного периода, а другая часть постепенно вводилась в строй в течение второго полупериода.

Сопоставление значений скоростей трендов ET<sub>aw</sub> внутри границ дождевальных машин в целом показало значимое их отличие от соседних с ними областей.

Таким образом, разработанная методика может рассматриваться в качестве современного геоинформационного инструмента анализа данных ДЗЗ, который необходим для локализации мест ведения орошаемого земледелия, а также анализа его функционирования.

*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».*

### Библиографический список

1. Использование данных дистанционного зондирования при моделировании водного и теплового режимов сельских территорий / Е.Л. Музылев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. № 6. – С. 108-136.
2. **Hayduk D.** Climate change, agriculture and food security. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013. – 1-194 p.
3. **Ermolaeva O.** et al. Warm Season Trends of ET<sub>a</sub>: A Case Study of Near-North Caspian Low Lands. Springer, Cham, 2019. – P. 41-44.
4. **Argaman E., Keesstra S.D., Zeiliger A.** Monitoring the impact of surface albedo on a saline lake in SW Russia // L. Degrad. Dev. – 2012. – Vol. 23. – № 4. – P. 398-408.
5. **Zhang H., Sun J., Xiong J.** Spatial-Temporal Patterns and Controls of Evapotranspiration across the Tibetan Plateau (2000-2012) // Adv. Meteorol. Hindawi Limited, 2017. – Vol. 2017.
6. **Kairis O.** et al. Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and Desertification Monitoring: Types of Degradation, Causes, and Implications for Management // Environ. Manage. Springer US, 2014. – Vol. 54. – № 5. – P. 971-982.
7. **Yang Y.** et al. Regional water balance based on remotely sensed evapotranspiration and irrigation: An assessment of the haihe plain, China // Remote Sens. MDPI AG, 2014. – Vol. 6. – № 3. – P. 2514-2533.
8. Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга / А.М. Зейлигер [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. № 3. – С. 33-43.

### References

1. Ispolzovanie dannyh distantsionnogo zondirovaniya pri modelirovanii vodnogo i teplovogo rezhimov selskih territorij / E.L. Muzylev [i dr.] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2017. – Т. 14. № 6. – S. 108-136.
2. **Hayduk D.** CLIMATE CHANGE, AGRICULTURE AND FOOD SECURITY. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013. 1-194 p.
3. **Ermolaeva O.** et al. Warm Season Trends of ET<sub>a</sub>: A Case Study of Near-North Caspian Low Lands. Springer, Cham, 2019. P. 41-44.
4. **Argaman E., Keesstra S.D., Zeiliger A.** Monitoring the impact of surface albedo on a saline lake in SW Russia // L. Degrad. Dev. 2012. Vol. 23, № 4. P. 398-408.
5. **Zhang H., Sun J., Xiong J.** Spatial-Temporal Patterns and Controls of Evapotranspiration across the Tibetan Plateau (2000-2012) // Adv. Meteorol. Hindawi Limited, 2017. Vol. 2017.
6. **Kairis O.** et al. Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and Desertification Monitoring: Types of Degradation, Causes, and Implications for Management // Environ. Manage. Springer US, 2014. Vol. 54, № 5. P. 971-982.
7. **Yang Y.** et al. Regional water balance based on remotely sensed evapotranspiration and irrigation: An assessment of the haihe plain, China // Remote Sens. MDPI AG, 2014. Vol. 6, № 3. P. 2514-2533.
8. Kompyuterny analiz rezhimov vodnogo stressa oroshaemyh agrotsenzov s ispolzovaniem SWAP-modeli, a takzhe dannyh nazemnogo i kosmicheskogo monitoringa / A.M. Zeyliger [I dr.] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2019. – Т. 16. № 3. – S. 33-43.

9. **Liu M.** et al. Effects of land-use and land-cover change on evapotranspiration and water yield in China during 1900-2000 // *J. Am. Water Resour. Assoc.* – 2008. Vol. 44. – № 5. – P. 1193-1207.
10. **Tüshaus J.** et al. Comparison of medium spatial resolution ENVISAT-MERIS and terra-MODIS time series for vegetation decline analysis: A case study in central Asia // *Remote Sens. MDPI AG*, 2014. – Vol. 6. – № 6. – P. 5238-5256.
11. **Зейлигер А.М., Ермолаева О.С.** Информационные технологии в мониторинге богарных и орошаемых агроценозов // *Современные наукоемкие технологии.* – 2016. – № 10-1. – С. 62-66.
12. **Зейлигер А.М., Ермолаева О.С.** Оценка водного стресса орошаемых агроценозов с использованием данных агрогидрологической модели SWAP, наземного (метеорологического) и космического мониторинга // *Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения.* – Новочеркасск: ООО «Лик», 2017. – С. 187-192.
13. **Running S.W.** et al. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). – 2019. – 1-38 p.
14. **Jin X., Guo R., Xia W.** Distribution of actual evapotranspiration over Qaidam basin, an Arid area in China // *Remote Sens.* – 2013. – Vol. 5. – № 12. – P. 6976-6996.
15. **Зейлигер А.М., Ермолаева О.С., Кричевцова А.Н.** Результаты пространственно-временного анализа наборов данных ДЗЗ 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.* – Р/на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. – С. 35-48.
16. **Иванова Г.Ф., Левицкая Н.Г.** Изменчивость максимально возможного и суммарного испарения на территории Саратовской области в условиях меняющегося климата // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия «Науки о Земле».* – 2015. – Т. 15. – Вып. 3. – С. 5-8.
17. Исследование предпочтительных потоков влаги в лугово-Черноземной почве Саратовского Заволжья / С.В. Затиначий [и др.] // *Почвоведение.* – 2007. – № 5. – С. 585-598.
18. EarthExplorer [Electronic resource]. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed: 14.03.2021).
9. **Liu M.** et al. Effects of land-use and land-cover change on evapotranspiration and water yield in China during 1900-2000 // *J. Am. Water Resour. Assoc.* – 2008. Vol. 44. – № 5. – P. 1193-1207.
10. **Tüshaus J.** et al. Comparison of medium spatial resolution ENVISAT-MERIS and terra-MODIS time series for vegetation decline analysis: A case study in central Asia // *Remote Sens. MDPI AG*, 2014. Vol. 6, № 6. P. 5238-5256.
11. **Zeyliger A.M., Ermolaeva O.S.** Informationsionnye tehnologii v monitoring bogarnyh i oroshaemyh agrotsenozov // *Sovremennye naukoemkie tehnologii.* – 2016. – № 10-1. – S. 62-66.
12. **Zeyliger A.M., Ermolaeva O.S.** Otsenka vodnogo stressa oroshaemyh agrotsenozov s ispolzovaniem dannyh agrogidrologicheskoy modeli SWAP, nazemnoo (meteorologicheskogo) i kosmicheskogo monitoring / *Vodnye resursy: novye vyzovy i puti resheniya.* – Novocherkassk: ООО «Lik», 2017. – S. 187-192.
13. **Running S.W.** et al. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). 2019. 1-38 p.
14. **Jin X., Guo R., Xia W.** Distribution of actual evapotranspiration over Qaidam basin, an Arid area in China // *Remote Sens.* – 2013. – Vol. 5, № 12. – P. 6976-6996.
15. **Zeyliger A.M., Ermolaeva O.S., Krichevtsova A.N.** Rezultaty prostranstvenno-vremennogo analiza naborov dannyh DZZ po ispareniiyu s poverhnosti sushi MOD16 et za 2000-2009 gody dlya territorii Pallasovskogo rajona Volgogradskoj oblasti RF // *Ekologiya. Ekonomika. Informatika: sb. statej v 3-h t.* – R/na-Donu: Yuzhny federalny universitet, 2015. – S. 35-48.
16. **Ivanova G.F., Levitskaya N.G.** Izmenchivost maksimalno vozmozhnogo i sum-marnogo ispareniiya na territorii Saratovskoj oblasti v usloviyah menyayushchegosya klimata // *Izvestiya Saratovskogo universite-ta. Novaya seriya. Seriya: Nauki o Zemle.* – 2015. – T. 15, vyp. 3. – S. 5-8.
17. Issledovanie predpochtitelnyh potokoh vlagi v lugovo-Chernozemnoj pochve Saratovskogo Zavolzhyia / S.V. Zatinatskij [i dr.] // *Pochvovedenie.* – 2007. – № 5. – S. 585-598.
18. EarthExplorer [Electronic resource]. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed: 14.03.2021).

19. Прототип геоинформационной базы данных многолетнего мониторинга грунтовых вод на Приволжской оросительной системе – пути ее развития, применения и распространения / А.М. Зейлигер, Т.А. Петровец, О.С. Ермолаева и др. // Мат-лы научно-практ. конф. (г. Волгоград, 26-28 мая 2010 г.). – Волгоград: ГНУ ПНИИЭМТ Россельхозакадемии, 2010.

#### Критерии авторства

Ермолаева О.С., Зейлигер А.М. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Ермолаева О.С., Зейлигер А.М. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 15.03.2021 г.

Одобрена после рецензирования 05.04.2021 г.

Принята к публикации 22.04.2021 г.

19. Prototip geoinformatsionnoj bazy danyh mnogoletnego monitoringa gruntovyh vod na Privolzhskoj orositelnoj sisteme – puti ee razvitiya, primeneniya i rasprostraneniya / Zeyliger A.M., Petrovets T.A., Ermolaeva O.S. i dr. / Mat-ly nauchno-prakt. konf. (26-28 maya 2010 goda, Volgograd) – Volgograd: GNU PNIEMT Rossel'hozakademii, 2010.

#### Criteria of authorship

Erolaeva O.S., Zeyliger A.M. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Erolaeva O.S., Zeyliger A.M. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 15.03.2021

Approved after reviewing 05.04.2021

Accepted for publication 22.04.2021

Оригинальная статья

УДК 502/504:631.62

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-25-31

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОРФА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ОСУШЕНИЯ

**ВАСИЛЕНКОВ СЕРГЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**✉, д-р техн. наук, доцент  
poivp@bgsha.com

**ДУНАЕВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ**, старший преподаватель  
A.I.Dunaev@yandex.ru

Брянский государственный аграрный университет; 243365, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, 2а, Россия

*Тематика исследований отражает одно из особых условий строительства мелиоративных систем на торфяниках: существенное изменение многих параметров, в том числе фильтрационных показателей торфяной залежи, вследствие осадки и уплотнения торфа в процессе его осушения. Данная исследовательская работа имеет научно-методический характер и представляет собой разработку новой методики расчёта. Конечной целью исследований является разработка методики расчёта, повышающей точность и надёжность существующих методов оценки изменяющихся водно-физических свойств торфа вследствие его осушения за счёт наибольшего охвата и учёта конкретных условий и расчётных факторов. Во вступительной части излагаются современное состояние вопроса и актуальность существующей проблемы. В основной части приводятся структура, математическая основа и расчётные формулы предлагаемой методики расчёта по прогнозированию снижения коэффициентов фильтрации и водоотдачи осушаемого торфа. Рассматривается и приводится конкретный пример расчёта по практическому использованию разработанной методики. В заключительной части даются анализ результатов исследований, основные выводы и рекомендации по практическому использованию данной методики.*

**Ключевые слова:** осушение торфяника, осадка торфа, осадка поверхности торфяника, увеличение плотности торфа, коэффициент фильтрации торфа, коэффициент водоотдачи торфа