

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-2-1128

EDN: UWOZGV

УДК 528.88: 504.064.37



Научные обзоры

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДЕКСА ICE ДЛЯ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ИРРИГАЦИОННЫХ МАССИВОВ И СОСТОЯНИЯ ЗЕМЕЛЬ

И.Ю. Савин, А.Г. Терехов, Р.И. Мухамедиев

Аннотация

Обоснование. В мире около половины сельскохозяйственных культур возделывается при орошении, которое оказывает влияние на климат полей, а также может повышать комфортность окружающей среды для человека. Развитие спутниковых технологий открыло возможности оперативного и низкозатратного мониторинга охлаждающего эффекта орошения Irrigation Cooling Effect (ICE). Это направление исследований проходит стадию становления, что предопределяет актуальность выявления текущего тренда его развития.

Цель. Провести анализ научной литературы в области использования спутникового индекса ICE для мониторинга орошаемых земель, выявить основные направления развития и научные центры.

Материалы и методы. В качестве основного источника информации использовались сведения наукометрических баз данных Scopus и РИНЦ. На конкретном примере показана связь ICE с NDVI для орошаемого массива СУАР в КНР.

Результаты. Анализ первоисточников показал, что в настоящее время ICE используется в основном для оценки охлаждающего эффекта орошения посевов и их водопотребления, охлаждающего эффекта растительности городов, для оценки влияния смены наземного покрова на локальный и региональный климат. Основными центрами исследований являются научные организации Китая и США, что подтверждается количеством научных публикаций и их цитируемостью. Перспективным направлением является использование ICE для оперативного спутникового мониторинга посевов (в том числе и неорошаемых).

Заключение. Таким образом, ICE может рассматриваться как полезное дополнение к обычно используемому при спутниковом мониторинге посевов

индексу NDVI, что обуславливает все более широкое использование данного индекса в мире, особенно для мониторинга орошаемых земель.

Ключевые слова: охлаждающий эффект ирригации; MODIS; NDVI; LST; орошение посевов; спутниковый мониторинг посевов

Для цитирования. Савин, И. Ю., Терехов, А. Г., & Мухамедиев, Р. И. (2025). Использование индекса ICE для спутникового мониторинга ирригационных массивов и состояния земель. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(2), 154-175. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1128>

Scientific Reviews

USE OF ICE INDEX FOR SATELLITE MONITORING OF IRRIGATION MASSIFS AND LAND CONDITIONS

I.Yu. Savin, A.G. Terekhov, R.I. Mukhamediev

Abstract

Background. Globally, about half of the world's crops are cultivated under irrigation, which affects the climate of the fields and can also increase the comfort of the environment for humans. The development of satellite technologies has opened up opportunities for rapid and low-cost monitoring of the Irrigation Cooling Effect (ICE). This area of research is in its infancy, which predetermines the relevance of identifying the current trend of its development.

Purpose. To analyze scientific literature in the field of ICE satellite index use for irrigated lands monitoring, to identify main directions of development and research centers.

Materials and methods. Information from the Scopus and RSCI databases was used as the main source of information. The case study demonstrates the relationship between ICE and NDVI for the XUAR irrigated area in the PRC.

Results. Analysis of primary literature sources has shown that at present ICE is used mainly to assess the cooling effect of irrigated crop and its water consumption, the cooling effect of urban vegetation, and to assess the impact of land cover change on local and regional climate. The main research centers are scientific organizations of China and the USA, which is confirmed by the number of scientific publications and amount of their citations. A promising direction is the use of ICE for operational satellite monitoring of crops (including rain-fed crops).

Conclusion. Thus, ICE can be regarded as a useful complement to the NDVI index commonly used in satellite crop monitoring, which causes the increasing use of this index in the world, especially for irrigated land monitoring.

Keywords: cooling irrigation effect; MODIS; NDVI; LST; crop irrigation; satellite-based crop monitoring

For citation. Savin, I. Yu., Terekhov, A. G., & Mukhamediev, R. I. (2025). Use of ICE index for satellite monitoring of irrigation massifs and land condition. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(2), 154-175. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-2-1128>

Введение

Урожайность сельскохозяйственных культур предопределяется такими факторами как приходом солнечной радиации, температурными и влажностными условиями, а также доступностью для роста растений питательных элементов [38]. Неоптимальность этих условий ведет к падению урожайности или полной непригодности земель для возделывания сельскохозяйственных культур. Путем дополнительных вложений человек может регулировать условия роста растений (от внесения удобрений до строительства теплиц с полным регулированием внешних условий), но это ведет к повышению себестоимости растениеводства и снижает его экономическую эффективность [2]. Оптимальным является размещение растениеводства в регионах с наиболее благоприятными внешними условиями. Но количество таких земель в мире сильно ограничено [15]. В результате поиска человечеством баланса оптимальности внешних условий и вложений на преодоление неоптимальности сложилась ситуация, когда большая часть пахотных земель в мире расположена в условиях недостатка влаги, где присутствуют оптимальные температуры воздуха и большое количество приходящей солнечной радиации, а регулируется лишь водный (орошением) и питательный (внесением удобрений) режимы возделывания сельскохозяйственных культур.

В настоящее время в мире около половины сельскохозяйственных культур возделывается при орошении [35] и на него приходится около 70% от всего потребления пресной воды в мире [13; 33; 34]. В условиях значительного превышения испаряемости над выпадающими осадками, обводнение территорий является необходимым условием для формирования сельскохозяйственной растительности. Ирригация сопровождается изменениями температурного режима подстилающей поверхности. Увлажнение корнеобитаемого слоя почвы за счет ирригационной инфраструктуры приводит к росту и развитию растительности. А испарение воды через листовое покрытие и с поверхности почвы сопровождается поглощением тепла и охлаждением подстилающей поверхности. Этот эффект известен под на-

званием Irrigation Cooling Effect (ICE). Практически, ICE представляет собой разницу температур между природным фоном и расположенным в нем ирригационным массивом (рис.1). Масштаб снижения температуры подстилающей поверхности зависит от температуры воздуха, его влажности, скорости ветра и прочих факторов и может быть довольно велик, до 20 градусов цельсия. Существующие спутниковые данные дистанционного зондирования в ИК-диапазоне позволяют с высокой точностью регистрировать температурные эффекты такого масштаба.

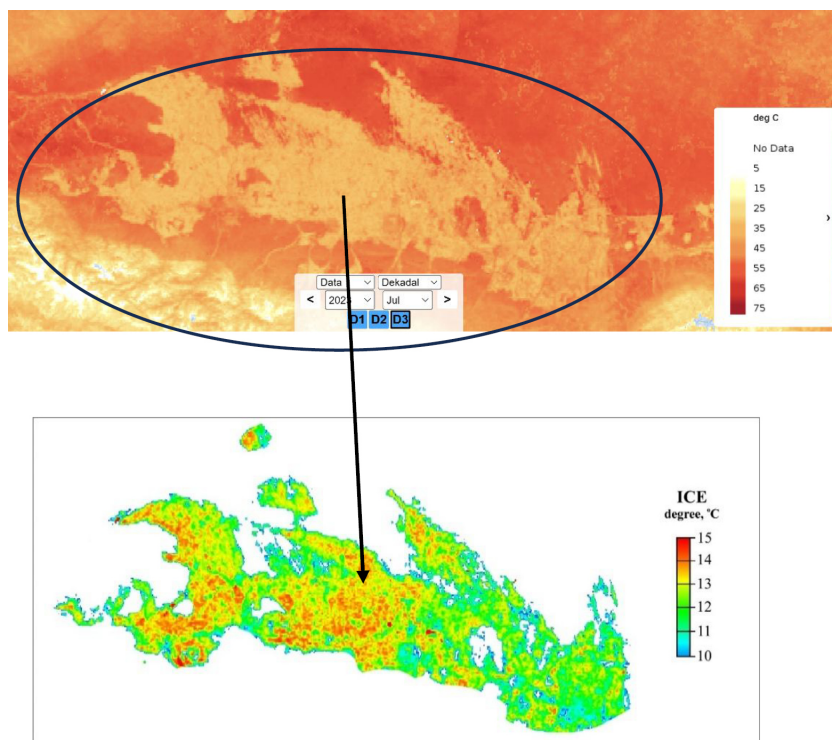


Рис. 1. Примеры температурного поля (LST eVIRS) (вверху) и рассчитанных по ним значений ICE для ирригационных массивов пашни северо-восточных предгорий Восточного Тянь-Шаня на 3-ю декаду 2023 года по данным LST_eVIIRS_Data_Dekadal (внизу)

Использование воды на орошение сельскохозяйственных культур оказывает влияние и на локальные изменения климата, на понижение тем-

пературы окружающей среды [7], что в свою очередь во многом может повышать комфортность окружающей среды для человека [23], а также улучшать температурные условия для роста сельскохозяйственных культур [46]. Рядом работ показано, что охлаждающий эффект от орошения может даже компенсировать потепление, обусловленное антропогенным выбросом в атмосферу парниковых газов [16; 20; 22; 29].

В связи с этим, мониторинг потребления воды на орошение сельскохозяйственных культур и связанный с этим охлаждающий эффект на подстилающей поверхности, имеет большое практическое значение. Традиционно, учет количества используемой для орошения воды ведется с помощью статистической обработки данных с наземных водомерных пунктов [10]. Этим методам, как и всем статистическим, присущи такие недостатки как неоперативность, трудоемкость и, часто, субъективность, пропуски данных и присутствие ошибок в данных. Изменение температуры воздуха близ орошаемых массивов может фиксироваться метеостанциями, но их количество (особенно в развивающихся странах) до сих пор очень мало для получения точной информации.

В аридном и жарком климате сельскохозяйственное землепользование требует для ирригации посевов большое количество пресной воды. Очень часто единственным её источником являются поверхностные воды в виде крупных рек, аккумулирующих сток в высокогорных зонах. Эти крупные и протяженные реки, как правило, являются трансграничными. Внутриконтинентальные крупные реки снежно-ледового питания имеют значительные межгодовые колебания в объемах стока, вызванные вариативностью погодных условий. Это создает проблемы водodelения и обуславливает конкуренцию за воду между странами верхних и нижних частей трансграничных речных бассейнов особенно в маловодные годы. Использование спутниковой информации открыло новые возможности для создания более точных, оперативных и объективных методов мониторинга сельскохозяйственного водопотребления, основанного на изменениях параметров окружающей среды, в том числе и ICE.

Основными направлениями исследований, связанных с ICE, являются разработка методов спутниковой оценки влажности почв [30], температуры их поверхности [25], оценки запасов воды в водохранилищах и естественных водоемах и их оперативного мониторинга [26], мониторинга открытой водной поверхности на сельскохозяйственных полях [1]. Одним из перспективных направлений развития в данной области науки является спутниковый анализ охлаждающего эффекта орошения (ICE) [4,40,41].

Цель исследования

Целью данной статьи являлся обзор научной литературы в области использования ICE в различных прикладных задачах, включая спутниковый мониторинг орошаемых сельскохозяйственных земель.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта анализа выступили публикации в научной литературе, проиндексированной в наукометрических базах данных РИНЦ (<https://elibrary.ru/defaultx.asp>) и Scopus (<https://www.scopus.com/>). Поиск в базах данных был осуществлен на 15 июня 2024 года по ключевым словам «ICE, remote sensing, irrigation cooling» (Scopus) и «ICE, спутниковый мониторинг, охлаждающий эффект орошения» (РИНЦ) в названиях, резюме и ключевых словах статей, книг и сборниках материалов конференций без ограничений по времени выхода публикации. Всего, после исключения повторений, было найдено 25 публикаций, из них 2 – на русском языке и 23 – на английском.

Перечень найденных публикаций приведен в Таблице 1.

Таблица 1.

Проанализированные публикации и их направленность

научная направленность публикации	ссылки на статьи
Оценка охлаждающего эффекта при орошении	[5,7,14,21,24,27,32,39,40,44-47]
Оценка охлаждающего эффекта растительности на температуру воздуха в городах	[8,12,19,36]
Оценка изменений температуры воздуха при изменении типа землепользования	[6,31,43]
Спутниковый контроль над водопотреблением посевов	[4,37,42]
Усовершенствование метода расчета ICE	[18]
Оценка охлаждающего эффекта ветряных электростанций	[28]

Был проведен анализ времени выхода публикаций в свет, их направленности, цитируемости, первоисточника (журнала и т.п.), страны и аффилиации авторов.

Демонстрация отдельных аспектов использования индекса ICE проведено на примере орошаемого массива СУАР КНР, расположенного на северной предгорной равнине Восточного Тянь-Шаня (хребты Боро-Хоро и Укэн-Хабырга) с экстрараидным климатом (рис.2). Используются продукты MOD13Q1 (16-days) и LST [Terra] (8 days).

Результаты и обсуждение

Охлаждающий эффект от орошения (ICE) известен в метеорологии достаточно давно [3], но широкие возможности для его площадного анализа стали доступны лишь после появления рядов детальных спутниковых данных о наземной температуре (LST). Поэтому первые публикации по возможности оценки ICE на основе спутниковых данных появились в 2011-2012 годах [36; 47]. Но основное их количество было опубликовано за последние 5 лет (рис. 3).

Две трети всех публикаций базируется на анализе данных LST MODIS, остальные – на анализе данных LST Landsat. Это предопределяет то, что большая часть публикаций носит региональный или глобальный характер, и лишь некоторые из них посвящены исследованиям на локальном уровне.



Рис. 2. Расположение орошаемого массива предгорий хребтов Восточного Тянь-Шаня (хребет Боро-Хоро и Укэн-Хабырга) в бассейнах озер Манас и Эби-Нур для демонстрации отдельных аспектов использования ICE [4]

Основные научные центры исследований в данном направлении сосредоточены в США и КНР. Вместе специалисты из этих стран издали около 2/3 всех публикаций по теме дистанционной оценки ICE. Больше всего публикаций (около 60%) издано авторами с аффилиацией Китайской академии наук и Пекинского нормального университета.

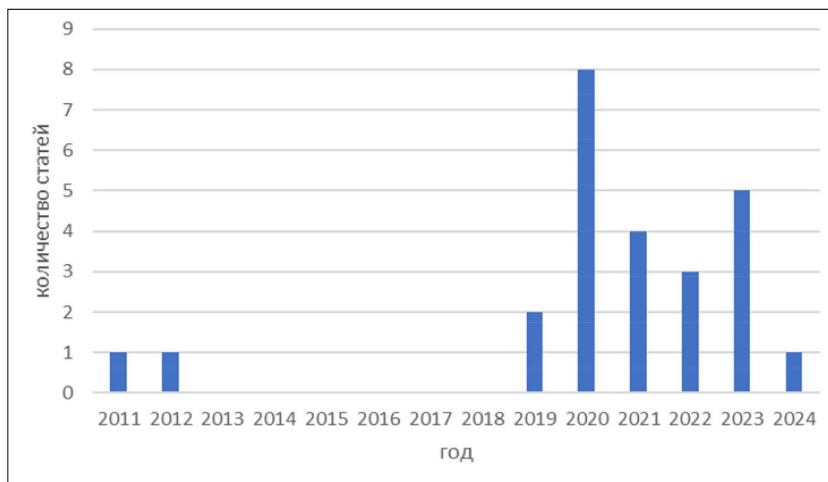


Рис. 3. Количество статей по теме оценки ICE на основе спутниковых данных

Больше всего статей по данному научному направлению опубликовано в журналах *Science Of The Total Environment* (4 статьи), *Agricultural And Forest Meteorology* (3), *Urban Climate* (2), *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* (2), *Remote Sensing* (2), *Journal Of Geophysical Research Atmospheres* (2).

Самыми цитируемыми на середину июня 2024 года являются статьи [24] (65 ссылок), [40] (60 ссылок) и [32] (55 ссылок).

Тематическая научная направленность публикаций представлена в Таблице 1. Ожидаемо наибольшее количество публикаций было посвящено оценке эффекта охлаждения при орошении посевов сельскохозяйственных культур (13 публикаций). Практически все авторы ограничивались количественной оценкой эффекта охлаждения. Теоретически, охлаждающий эффект может быть обусловлен как влиянием более низкой температуры самой воды, используемой для орошения, так и транспирацией листьев растений [17]. Но, возможности разделение влияния этих факторов до сих пор остаются неисследованными, несмотря на потенциально большую практическую значимость оперативного получения подобной информации.

Вторым по количеству публикаций направлением является использование индекса ICE для оценки охлаждающего эффекта растительности на температуру воздуха в городах (4 публикации). Это направление не имеет отношения к орошению посевов, но в данных публикациях показано, что

этот индекс может служить надежным индикатором охлаждения городов, в большей степени связанного именно с транспирацией растительности.

Публикации рассмотренных двух направлений и наличие многолетних рядов спутниковых данных о LST предопределили возможность использования индекса ICE для оценки изменений температурного режима территории в результате изменения наземного покрова и типа землепользования. Три публикации демонстрируют возможности индекса в этом научном направлении.

Также три статьи посвящены анализу возможностей использования ICE для мониторинга водопотребления орошаемых посевов.

В одной статье [18] рассмотрен сам метод вычисления ICE и предложены подходы к их усовершенствованию. И еще одна статья посвящена достаточно экзотическому анализу на основе ICE охлаждающего эффекта от действия ветряных электростанций [28].

Проведенный анализ показал, что данное научное направление находится только в начале своего развития. Но потенциал расширения направлений его использования в ближайшем будущем не вызывает сомнений. Одним из наиболее перспективных, по-видимому, является использование индекса ICE (как индикатора водного режима растений) для мониторинга состояния посевов и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.

Проведенный нами анализ для орошаемого массива СУАР (КНР) показал, что значение ICE хорошо коррелирует со значениями NDVI (рис. 4).

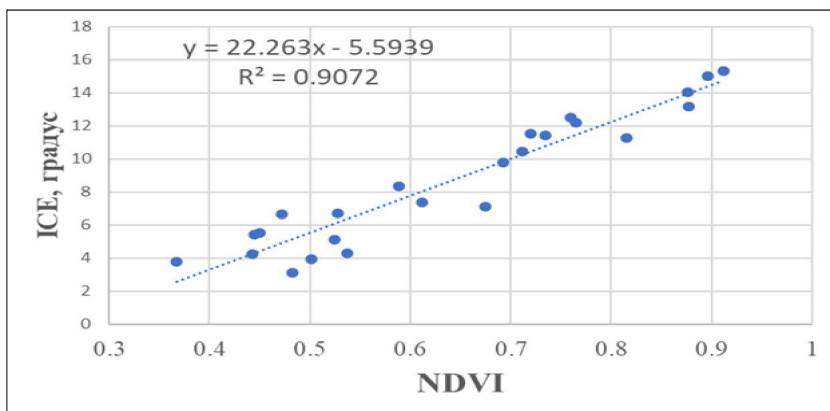


Рис. 4. Взаимосвязь осредненных многолетних значений NDVI (Terra MODIS) с ICE для орошаемого массива СУАР

В отличие от известных вегетационных индексов (NDVI и др.), опирающихся на спутниковые каналы в оптическом диапазоне (Red, NIR и др.), ICE полностью базируется тепловой съемке. Таким образом, ICE характеризует интенсивность эвапотранспирации с листовой поверхности/почвы и формально, на прямую, не связан с содержанием хлорофилла в листьях. В случаях, когда объектом исследования является обзорный многолетний мониторинг массивов поливной пашни и высокое пространственное разрешение спутниковых данных не является необходимым условием, ICE имеет информационную насыщенность схожую с NDVI ($ICE/NDVI R^2 = (0.88 - 0.91)$ по временной шкале, и $R^2 = 0.9$ по пространственной согласованности). Однако принципиальное различие физических основ анализируемых параметров (тепловая съемка против съемки в оптических каналах) обеспечивает получение независимой от оптических данных картины многолетних изменений в состоянии поливной пашни, с упором на оценку интенсивности эвапотранспирации, а следовательно, и водообеспеченности посевов. Для сравнения на рисунке 5 приведены примеры временного профиля NDVI и ICE для двух временных периодов.

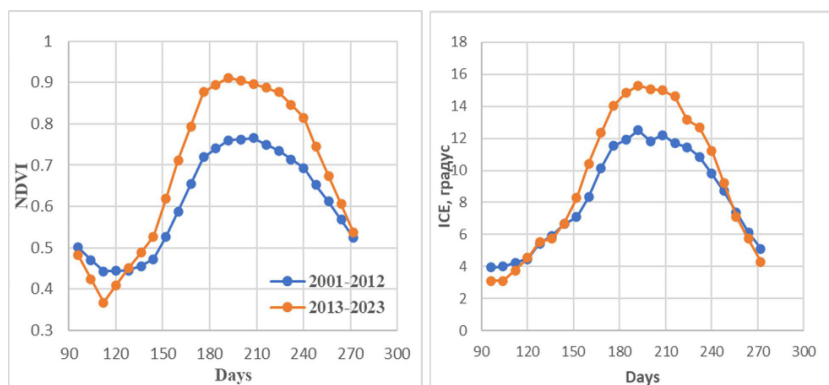


Рис. 5. Временные профили осредненных многолетних значений NDVI (Terra MODIS) с ICE для орошаемого массива СУАР

Дополнительным преимуществом ICE должно являться, по-видимому, и отсутствие насыщения индекса, которое характерно для NDVI [9; 11].

Выводы

Использование индекса ICE для спутникового мониторинга растительности, ее водопотребления и орошения находится в начале своего раз-

вития. В большинстве случаев в настоящее время ICE используется для оценки охлаждающего эффекта орошения посевов и их водопотребления, охлаждающего эффекта растительности городов, для оценки влияния смены наземного покрова на локальный и региональный климат. Основными центрами исследований в данном направлении являются научные организации Китая (научные организации Академии наук Китая) и США, что подтверждается и количеством научных публикаций и их цитируемостью.

Перспективным направлением является использование ICE для оперативного спутникового мониторинга посевов (в том числе и неорошаемых). Этот индекс имеет потенциал получения дополнительной информации к традиционно используемому в таких случаях вегетационному индексу NDVI.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследования были поддержаны комитетом науки, министерство науки и высшего образования Республики Казахстан, гранты № BR21881908; BR24992908.

Список литературы

1. Абаев, Н. Н., Сагатдинова, Г. Н., Маглинец, Ю. А., Амиргалиев, Е. Н., Савин, И. Ю., & Терехов, А. Г. (2023). Спутниковый мониторинг зимней промывки пашни от вторичного засоления на примере ирригационного массива «Голодная степь» (Казахстан). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 20(3), 152-163. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-152-163> EDN: <https://elibrary.ru/GWEJTE>
2. Савин, И. Ю. (2020). Пространственные аспекты прикладного почвоведения. *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*, 101, 5-18. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18> EDN: <https://elibrary.ru/XOVGZT>
3. Скворцов, А. А. (1964). *Орошение сельскохозяйственных полей и микроклимат*. Л.: ГИМИЗ, 277 с.
4. Терехов, А. Г. (2020). Спутниковая диагностика изменений сельскохозяйственного водообеспечения Синьцзян-Уйгурского автономного района КНР на основе эффекта охлаждения поверхности пашни при ирригации по данным 2002-2019 гг. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 17(7), 131-141. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-131-141> EDN: <https://elibrary.ru/MTQRDA>

5. Терехов, А. Г., Абаев, Н. Н., Маглинец, Ю. А. (2021). Спутниковый мониторинг состояния оазисов реки Амударьи в период 2003-2020 гг. на основе анализа эффекта охлаждения территорий в результате их ирригации. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 18(5), 123-132. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132> EDN: <https://elibrary.ru/VVWEGH>
6. Akinyemi, F. O., Ikanyeng, M., & Muro, J. (2019). Land cover change effects on land surface temperature trends in an African urbanizing dryland region. *City and Environment Interactions*, 4, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100029> EDN: <https://elibrary.ru/QDKYQU>
7. Albaladejo-García, J. A., Alcon, F., & Martínez-Paz, J. M. (2020). The Irrigation Cooling Effect as a Climate Regulation Service of Agroecosystems. *Water*, 12, 1553. <https://doi.org/10.3390/w12061553> EDN: <https://elibrary.ru/DZTZTW>
8. Allen, M. A., Roberts, D. A., & McFadden, J. P. (2021). Reduced urban green cover and daytime cooling capacity during the 2012-2016 California drought. *Urban Climate*, 36, 100768. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100768> EDN: <https://elibrary.ru/RRXUZZ>
9. Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T., & Hatfield, J. L. (1984). Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. *Agron. J.*, 76, 300-306. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x>
10. Batchelor, C., Hoogeveen, J., Faurès, J. M., & Peiser, L. (2016). *Water accounting and auditing - A sourcebook*. FAO WATER REPORTS 43. Rome: FAO, 232 p.
11. Chen, P. Y., Fedosejevs, G., Tiscareño-López, M., & Arnold, J. G. (2006). Assessment of MODIS-EVI, MODIS-NDVI and VEGETATION-NDVI Composite Data Using Agricultural Measurements: An Example at Corn Fields in Western Mexico. *Environ Monit Assess*, 119, 69-82. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9006-7> EDN: <https://elibrary.ru/ITUORM>
12. Coleman, R. W., Stavros, N., Hulley, G., & Parazoo, N. (2020). Comparison of thermal infrared-derived maps of irrigated and non-irrigated vegetation in urban and non-urban areas of southern California. *Remote Sensing*, 12(24), 4102. <https://doi.org/10.3390/rs12244102> EDN: <https://elibrary.ru/VGPQQE>
13. Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: A global-scale assessment. *Environ. Res. Lett.*, 4, 035006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035006> EDN: <https://elibrary.ru/OMQJVH>
14. Dong, J., Pang, Z., Lin, S., Zhang, X., Xie, Z., Ren, P., Zhang, X., & Yuan, W. (2024). Cotton lands induced cooling effect on land surface temperature in Xin-

- jiang, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 351, 110004. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110004> EDN: <https://elibrary.ru/BAUECQ>
15. Fischer, G., van Velthuizen, H. T., Shah, M. M., & Nachtergaele, F. O. (2002). *Global Agroecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. IIASA Research Report. IIASA, Laxenburg, Austria: RR-02-02, 155 p.
 16. Gao, K., Santamouris, M., & Feng, J. (2020). On the cooling potential of irrigation to mitigate urban heat island. *Sci. Total Environ.*, 740, 139754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139754> EDN: <https://elibrary.ru/IYNCH>
 17. Hou, M., Tian, F., Zhang, T., & Huang, M. (2019). Evaluation of canopy temperature depression, transpiration, and canopy greenness in relation to yield of soybean at reproductive stage based on remote sensing imagery. *Agric. Water Manag.*, 222, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.005>
 18. Hou, M., Zhao, L., & Lin, A. (2023). Irrigation Cooling Effect on Local Temperatures in the North China Plain Based on an Improved Detection Method. *Remote Sens.*, 15, 4571. <https://doi.org/10.3390/rs15184571> EDN: <https://elibrary.ru/NYVFOZ>
 19. Kucera, D., & Jenerette, G. D. (2023). Urban greenness and its cooling effects are influenced by changes in drought, physiography, and socio-demographics in Los Angeles, CA. *Urban Climate*, 52, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101743> EDN: <https://elibrary.ru/PKGLZP>
 20. Kueppers, L. M., Snyder, M. A., & Sloan, L. C. (2007). Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L03703. <https://doi.org/10.1029/2006GL028679>
 21. Lawston, P. M., Santanello, J. A., Jr., Hanson, B., & Arsensault, K. (2020). Impacts of irrigation on summertime temperatures in the pacific northwest. *Earth Interactions*, 24(1), 1. <https://doi.org/10.1175/ei-d-19-0015.1> EDN: <https://elibrary.ru/BQTKUO>
 22. Li, D., Chen, Y., Hu, T., Cui, Y., Luo, Y., Luo, H., & Meng, Q. (2020). Climate changes in the Lhasa River basin, Tibetan Plateau: Irrigation induced cooling along with a warming trend. *Theor. Appl. Climatol.*, 140, 1043-1054. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03146-y> EDN: <https://elibrary.ru/MLEQAS>
 23. Li, M. (2024). Research on the effects of extreme heat exposure on human health. *Theoretical and Natural Science*, 29, 194-199. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/29/20240777> EDN: <https://elibrary.ru/BQKVKA>
 24. Li, Y., Guan, K., Peng, B., Franz, T. E., Wardlow, B., & Pan, M. (2020). Quantifying irrigation cooling benefits to maize yield in the US Midwest. *Global Change Biology*, 26(5), 3065-3078. <https://doi.org/10.1111/gcb.15002> EDN: <https://elibrary.ru/UQBZXM>

25. Li, Z.-L., Wu, H., Duan, S.-B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., Leng, P., Tang, R., Ye, X., Zhu, J., Sun, Y., Si, S., Liu, M., Li, J., Zhang, X., Shang, G., Tang, B.-H., Yan, G., & Zhou, C. (2022). Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. *Reviews of Geophysics.*, 61, e2022RG000777. <https://doi.org/10.1029/2022RG000777> EDN: <https://elibrary.ru/YASDOG>
26. Lin, Y., Li, X., Zhang, T., Chao, N., Yu, J., Cai, J., & Sneeuw, N. (2020). Water Volume Variations Estimation and Analysis Using Multisource Satellite Data: A Case Study of Lake Victoria. *Remote Sensing*, 12(18), 3052. <https://doi.org/10.3390/rs12183052> EDN: <https://elibrary.ru/OYXBLN>
27. Liu, J., Jin, J., & Niu, G.-Y. (2021). Effects of Irrigation on Seasonal and Annual Temperature and Precipitation over China Simulated by the WRF Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(10), e2020JD034222. <https://doi.org/10.1029/2020jd034222> EDN: <https://elibrary.ru/CKHLTN>
28. Liu, N., Zhao, X., Zhang, X., Zhao, J., Wang, H., & Wu, D. (2023). Remotely sensed evidence of the divergent climate impacts of wind farms on croplands and grasslands. *Science of the Total Environment*, 905, 167203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167203> EDN: <https://elibrary.ru/WMEXBO>
29. Lobell, D. B., Bonfils, C. J., Kueppers, L. M., & Snyder, M. A. (2008). Irrigation cooling effect on temperature and heat index extremes. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L09705. <https://doi.org/10.1029/2008GL034145> EDN: <https://elibrary.ru/MEZKMF>
30. Mu, T., Liu, G., Yang, X., & Yu, Y. (2023). Soil-Moisture Estimation Based on Multiple-Source Remote-Sensing Images. *Remote Sensing*, 15(1), 139. <https://doi.org/10.3390/rs15010139> EDN: <https://elibrary.ru/TSTQEM>
31. Pan, T., Zhang, C., Kuang, W., Luo, G., Du, G., & Yin, Z. (2020). Large-scale rain-fed to paddy farmland conversion modified land-surface thermal properties in Cold China. *Science of the Total Environment*, 722, 137917. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137917> EDN: <https://elibrary.ru/VPQTHT>
32. Shah, H. L., Zhou, T., Huang, M., & Mishra (2019). Strong Influence of Irrigation on Water Budget and Land Surface Temperature in Indian Subcontinental River Basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3), 1449-1462. <https://doi.org/10.1029/2018JD029132>
33. Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water Int.*, 25, 11-32. <https://doi.org/10.1080/02508060008686794> EDN: <https://elibrary.ru/LGHWKX>
34. Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation-A global inventory. *Hydrol.*

- Earth Syst. Sci.*, 14, 1863-1880. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010> EDN: <https://elibrary.ru/OLGCBP>
35. Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J. M., Frenken, K., & Feick, S. (2005). Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 535-547. <https://doi.org/10.5194/hess-9-535-2005> EDN: <https://elibrary.ru/LZZIDH>
36. Tan, C.-H., Chu, T.-W., & Jao, C.-C. (2011). Cooling effect range assessment of paddy fields in urban neighborhood by Landsat thermal imagery. In *32nd Asian Conference on Remote Sensing 2011, ACRS 2011* (Vol. 3, pp. 1857-1862).
37. Terekhov, A., & Abayev, N. (2020). Irrigation cooling effect: Opportunities in task of estimation of international irrigation water usage in transboundary River Syrdarya basin, Central Asia. *E3S Web of Conferences*, 223, 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022302009> EDN: <https://elibrary.ru/EFLHOB>
38. van Keulen, H., & Wolf, J. (1986). Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Wageningen: Pudoc, pp. 235-247.
39. Wang, Z., Vivoni, E. R., Bohn, T. J., & Wang, Z.-H. (2021). A Multiyear Assessment of Irrigation Cooling Capacity in Agricultural and Urban Settings of Central Arizona. *Journal of the American Water Resources Association*, 57(5), 771-788. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12920>
40. Yang, Q., Huang, X., & Tang, Q. (2020). Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations. *Science of the Total Environment*, 705, 135984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135984> EDN: <https://elibrary.ru/DDZSII>
41. Yang, Q., Huang, X., & Tang, Q. (2020). Global assessment of the impact of irrigation on land surface temperature. *Science Bulletin*, 65(17), 1440-1443. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.04.005> EDN: <https://elibrary.ru/MRLEHK>
42. Zhang, C., Dong, J., Leng, G., Doughty, R., Zhang, K., Han, S., Zhang, G., Zhang, X., & Ge, Q. (2023). Attenuated cooling effects with increasing water-saving irrigation: Satellite evidence from Xinjiang, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 333, 109397. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109397> EDN: <https://elibrary.ru/SZUKJF>
43. Zhang, C., Ge, Q., Dong, J., Zhang, X., Li, Y., & Han, S. (2023). Characterizing spatial, diurnal, and seasonal patterns of agricultural irrigation expansion-induced cooling in Northwest China from 2000 to 2020. *Agricultural and Forest Meteorology*, 330, 109304. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109304> EDN: <https://elibrary.ru/DUVCKR>
44. Zhang, F., Peng, K., & Zhang, F. (2022). Spatial distribution characteristics of land surface temperature and its “source-sink” effect in Yanqi Basin, Xinji-

- ang. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(16), 153-161.
45. Zhang, Z., Lin, A., Zhao, L., & Zhao, B. (2022). Attribution of local land surface temperature variations response to irrigation over the North China Plain. *Science of the Total Environment*, 826, 154104. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154104> EDN: <https://elibrary.ru/VVPALD>
46. Zhu, P., & Burney, J. (2022). Untangling irrigation effects on maize water and heat stress alleviation using satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(3), 827-840. <https://doi.org/10.5194/hess-26-827-2022> EDN: <https://elibrary.ru/ZVSAOD>
47. Zhu, X., Liang, S., & Pan, Y. (2012). Observational evidence of the cooling effect of agricultural irrigation in Jilin, China. *Climatic Change*, 114(3-4), 799-811. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0435-3> EDN: <https://elibrary.ru/HZMVUW>

References

1. Abaev, N. N., Sagatdinova, G. N., Maglinets, Yu. A., Amirgaliiev, E. N., Savin, I. Yu., & Terekhov, A. G. (2023). Satellite monitoring of winter leaching of arable land from secondary salinization on the example of the “Golodnaya Steppe” irrigation area (Kazakhstan). *Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, 20(3), 152-163. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-3-152-163> EDN: <https://elibrary.ru/GWEJTE>
2. Savin, I. Yu. (2020). Spatial aspects of applied soil science. *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*, 101, 5-18. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-101-5-18> EDN: <https://elibrary.ru/XOVGZT>
3. Skvortsov, A. A. (1964). *Irrigation of agricultural fields and microclimate*. Leningrad: GIMIZ. 277 p.
4. Terekhov, A. G. (2020). Satellite diagnostics of changes in agricultural water supply of the Xinjiang Uygur Autonomous Region of the PRC based on the surface cooling effect of irrigated farmland based on data from 2002 to 2019. *Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, 17(7), 131-141. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-131-141> EDN: <https://elibrary.ru/MTQRDA>
5. Terekhov, A. G., Abaev, N. N., & Maglinets, Yu. A. (2021). Satellite monitoring of the state of the Amu Darya oases during the period from 2003 to 2020 based on the analysis of the cooling effect of the territories as a result of their irrigation. *Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, 18(5), 123-132. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132> EDN: <https://elibrary.ru/VVWEGH>

6. Akinyemi, F. O., Ikanyeng, M., & Muro, J. (2019). Land cover change effects on land surface temperature trends in an African urbanizing dryland region. *City and Environment Interactions*, 4, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100029> EDN: <https://elibrary.ru/QDKYQU>
7. Albaladejo-García, J. A., Alcon, F., & Martínez-Paz, J. M. (2020). The Irrigation Cooling Effect as a Climate Regulation Service of Agroecosystems. *Water*, 12, 1553. <https://doi.org/10.3390/w12061553> EDN: <https://elibrary.ru/DZTZTW>
8. Allen, M. A., Roberts, D. A., & McFadden, J. P. (2021). Reduced urban green cover and daytime cooling capacity during the 2012-2016 California drought. *Urban Climate*, 36, 100768. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100768> EDN: <https://elibrary.ru/RRXUZZ>
9. Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T., & Hatfield, J. L. (1984). Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. *Agron. J.*, 76, 300-306. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x>
10. Batchelor, C., Hoozevee, J., Faurès, J. M., & Peiser, L. (2016). *Water accounting and auditing - A sourcebook*. FAO WATER REPORTS 43. Rome: FAO, 232 p.
11. Chen, P. Y., Fedosejevs, G., Tiscareño-López, M., & Arnold, J. G. (2006). Assessment of MODIS-EVI, MODIS-NDVI and VEGETATION-NDVI Composite Data Using Agricultural Measurements: An Example at Corn Fields in Western Mexico. *Environ Monit Assess*, 119, 69-82. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9006-7> EDN: <https://elibrary.ru/ITUORM>
12. Coleman, R. W., Stavros, N., Hulley, G., & Parazoo, N. (2020). Comparison of thermal infrared-derived maps of irrigated and non-irrigated vegetation in urban and non-urban areas of southern California. *Remote Sensing*, 12(24), 4102. <https://doi.org/10.3390/rs12244102> EDN: <https://elibrary.ru/VGPQQE>
13. Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: A global-scale assessment. *Environ. Res. Lett.*, 4, 035006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035006> EDN: <https://elibrary.ru/OMQJVH>
14. Dong, J., Pang, Z., Lin, S., Zhang, X., Xie, Z., Ren, P., Zhang, X., & Yuan, W. (2024). Cotton lands induced cooling effect on land surface temperature in Xinjiang, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 351, 110004. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110004> EDN: <https://elibrary.ru/BAUECQ>
15. Fischer, G., van Velthuizen, H. T., Shah, M. M., & Nachtergaele, F. O. (2002). *Global Agroecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results*. IIASA Research Report. IIASA, Laxenburg, Austria: RR-02-02, 155 p.

16. Gao, K., Santamouris, M., & Feng, J. (2020). On the cooling potential of irrigation to mitigate urban heat island. *Sci. Total Environ.*, 740, 139754. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139754> EDN: <https://elibrary.ru/IYNCH>
17. Hou, M., Tian, F., Zhang, T., & Huang, M. (2019). Evaluation of canopy temperature depression, transpiration, and canopy greenness in relation to yield of soybean at reproductive stage based on remote sensing imagery. *Agric. Water Manag.*, 222, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.005>
18. Hou, M., Zhao, L., & Lin, A. (2023). Irrigation Cooling Effect on Local Temperatures in the North China Plain Based on an Improved Detection Method. *Remote Sens.*, 15, 4571. <https://doi.org/10.3390/rs15184571> EDN: <https://elibrary.ru/NYVFOZ>
19. Kucera, D., & Jenerette, G. D. (2023). Urban greenness and its cooling effects are influenced by changes in drought, physiography, and socio-demographics in Los Angeles, CA. *Urban Climate*, 52, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101743> EDN: <https://elibrary.ru/PKGLZP>
20. Kueppers, L. M., Snyder, M. A., & Sloan, L. C. (2007). Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L03703. <https://doi.org/10.1029/2006GL028679>
21. Lawston, P. M., Santanello, J. A., Jr., Hanson, B., & Arsensault, K. (2020). Impacts of irrigation on summertime temperatures in the pacific northwest. *Earth Interactions*, 24(1), 1. <https://doi.org/10.1175/ei-d-19-0015.1> EDN: <https://elibrary.ru/BQTKUO>
22. Li, D., Chen, Y., Hu, T., Cui, Y., Luo, Y., Luo, H., & Meng, Q. (2020). Climate changes in the Lhasa River basin, Tibetan Plateau: Irrigation induced cooling along with a warming trend. *Theor. Appl. Climatol.*, 140, 1043-1054. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03146-y> EDN: <https://elibrary.ru/MLEQAS>
23. Li, M. (2024). Research on the effects of extreme heat exposure on human health. *Theoretical and Natural Science*, 29, 194-199. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/29/20240777> EDN: <https://elibrary.ru/BQKVKA>
24. Li, Y., Guan, K., Peng, B., Franz, T. E., Wardlow, B., & Pan, M. (2020). Quantifying irrigation cooling benefits to maize yield in the US Midwest. *Global Change Biology*, 26(5), 3065-3078. <https://doi.org/10.1111/gcb.15002> EDN: <https://elibrary.ru/UQBZXM>
25. Li, Z.-L., Wu, H., Duan, S.-B., Zhao, W., Ren, H., Liu, X., Leng, P., Tang, R., Ye, X., Zhu, J., Sun, Y., Si, S., Liu, M., Li, J., Zhang, X., Shang, G., Tang, B.-H., Yan, G., & Zhou, C. (2022). Satellite Remote Sensing of Global Land Surface Temperature: Definition, Methods, Products, and Applications. *Reviews of Geophysics.*, 61, e2022RG000777. <https://doi.org/10.1029/2022RG000777> EDN: <https://elibrary.ru/YASDOG>

26. Lin, Y., Li, X., Zhang, T., Chao, N., Yu, J., Cai, J., & Sneeuw, N. (2020). Water Volume Variations Estimation and Analysis Using Multisource Satellite Data: A Case Study of Lake Victoria. *Remote Sensing*, 12(18), 3052. <https://doi.org/10.3390/rs12183052> EDN: <https://elibrary.ru/OYXBLN>
27. Liu, J., Jin, J., & Niu, G.-Y. (2021). Effects of Irrigation on Seasonal and Annual Temperature and Precipitation over China Simulated by the WRF Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(10), e2020JD034222. <https://doi.org/10.1029/2020jd034222> EDN: <https://elibrary.ru/CKHLTN>
28. Liu, N., Zhao, X., Zhang, X., Zhao, J., Wang, H., & Wu, D. (2023). Remotely sensed evidence of the divergent climate impacts of wind farms on croplands and grasslands. *Science of the Total Environment*, 905, 167203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167203> EDN: <https://elibrary.ru/WMEXBO>
29. Lobell, D. B., Bonfils, C. J., Kueppers, L. M., & Snyder, M. A. (2008). Irrigation cooling effect on temperature and heat index extremes. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L09705. <https://doi.org/10.1029/2008GL034145> EDN: <https://elibrary.ru/MEZKNF>
30. Mu, T., Liu, G., Yang, X., & Yu, Y. (2023). Soil-Moisture Estimation Based on Multiple-Source Remote-Sensing Images. *Remote Sensing*, 15(1), 139. <https://doi.org/10.3390/rs15010139> EDN: <https://elibrary.ru/TSTQEM>
31. Pan, T., Zhang, C., Kuang, W., Luo, G., Du, G., & Yin, Z. (2020). Large-scale rain-fed to paddy farmland conversion modified land-surface thermal properties in Cold China. *Science of the Total Environment*, 722, 137917. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137917> EDN: <https://elibrary.ru/VPQTHT>
32. Shah, H. L., Zhou, T., Huang, M., & Mishra (2019). Strong Influence of Irrigation on Water Budget and Land Surface Temperature in Indian Subcontinental River Basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3), 1449-1462. <https://doi.org/10.1029/2018JD029132>
33. Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water Int.*, 25, 11-32. <https://doi.org/10.1080/02508060008686794> EDN: <https://elibrary.ru/LGHWKX>
34. Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation-A global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 1863-1880. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010> EDN: <https://elibrary.ru/OLGCBP>
35. Siebert, S., Döll, P., Hoogeveen, J., Faures, J. M., Frenken, K., & Feick, S. (2005). Development and validation of the global map of irrigation areas. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 9, 535-547. <https://doi.org/10.5194/hess-9-535-2005> EDN: <https://elibrary.ru/LZZIDH>

36. Tan, C.-H., Chu, T.-W., & Jao, C.-C. (2011). Cooling effect range assessment of paddy fields in urban neighborhood by Landsat thermal imagery. In *32nd Asian Conference on Remote Sensing 2011, ACRS 2011* (Vol. 3, pp. 1857-1862).
37. Terekhov, A., & Abayev, N. (2020). Irrigation cooling effect: Opportunities in task of estimation of international irrigation water usage in transboundary River Syrdarya basin, Central Asia. *E3S Web of Conferences*, 223, 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022302009> EDN: <https://elibrary.ru/EFLHOB>
38. van Keulen, H., & Wolf, J. (1986). Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Wageningen: Pudoc, pp. 235-247.
39. Wang, Z., Vivoni, E. R., Bohn, T. J., & Wang, Z.-H. (2021). A Multiyear Assessment of Irrigation Cooling Capacity in Agricultural and Urban Settings of Central Arizona. *Journal of the American Water Resources Association*, 57(5), 771-788. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12920>
40. Yang, Q., Huang, X., & Tang, Q. (2020). Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations. *Science of the Total Environment*, 705, 135984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135984> EDN: <https://elibrary.ru/DDZSII>
41. Yang, Q., Huang, X., & Tang, Q. (2020). Global assessment of the impact of irrigation on land surface temperature. *Science Bulletin*, 65(17), 1440-1443. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.04.005> EDN: <https://elibrary.ru/MRLEHK>
42. Zhang, C., Dong, J., Leng, G., Doughty, R., Zhang, K., Han, S., Zhang, G., Zhang, X., & Ge, Q. (2023). Attenuated cooling effects with increasing water-saving irrigation: Satellite evidence from Xinjiang, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 333, 109397. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109397> EDN: <https://elibrary.ru/SZUKJF>
43. Zhang, C., Ge, Q., Dong, J., Zhang, X., Li, Y., & Han, S. (2023). Characterizing spatial, diurnal, and seasonal patterns of agricultural irrigation expansion-induced cooling in Northwest China from 2000 to 2020. *Agricultural and Forest Meteorology*, 330, 109304. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109304> EDN: <https://elibrary.ru/DUVCKR>
44. Zhang, F., Peng, K., & Zhang, F. (2022). Spatial distribution characteristics of land surface temperature and its “source-sink” effect in Yanqi Basin, Xinjiang. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(16), 153-161.
45. Zhang, Z., Lin, A., Zhao, L., & Zhao, B. (2022). Attribution of local land surface temperature variations response to irrigation over the North China Plain. *Science of the Total Environment*, 826, 154104. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154104> EDN: <https://elibrary.ru/VVPALD>

46. Zhu, P., & Burney, J. (2022). Untangling irrigation effects on maize water and heat stress alleviation using satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(3), 827-840. <https://doi.org/10.5194/hess-26-827-2022> EDN: <https://elibrary.ru/ZVSAOD>
47. Zhu, X., Liang, S., & Pan, Y. (2012). Observational evidence of the cooling effect of agricultural irrigation in Jilin, China. *Climatic Change*, 114(3-4), 799-811. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0435-3> EDN: <https://elibrary.ru/HZMVUW>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Савин Игорь Юрьевич, академик РАН, д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник
Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»
Пыжевский пер., 7, стр. 2, г. Москва, 119017, Российская Федерация
savin_iyu@esoil.ru

Терехов Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
Институт информационных и вычислительных технологий МОН
ул. Пушкина, 125, г. Алматы, 050010, Республика Казахстан
info@ipic.kz

Мухамедиев Равиль Иргизович, доктор технических наук, профессор
Казахский Научно-Исследовательский Технический Университет им. К.И. Сатпаева
ул. Сатпаева, 22, г. Алматы, 050043, Республика Казахстан
r.mukhamediev@satbayev.university

DATA ABOUT THE AUTHORS

Igor Yu. Savin, Academician of RAS, Dr. Sc. (Agriculture), Chief Researcher
Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute"

7, bld.2, Pyzhevsky per., Moscow, 119017, Russian Federation
savin_iyu@esoil.ru
SPIN-code: 5132-0631
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>
ResearcherID: H-8117-2013
Scopus Author ID: 7003650252

Alexey G. Terekhov, Dr. Sc. (Technical), Chief Researcher
Institute of Information and Computing Technologies, Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan
125, Pushkin Str., Almaty, 050010, Kazakhstan
info@ipic.kz
SPIN-code: 7929-1104
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3209-1333>
ResearcherID: V-4393-2017
Scopus Author ID: 7005885252

Ravil I. Mukhamediev, Dr. Sc. (Technical), Professor
K.I. Satpayev Kazakh Research Technical University
Almaty, 050000, Kazakhstan
22, Satpayev Str., 22, Almaty, 050043, Kazakhstan
r.mukhamediev@satbayev.university
SPIN-code: 9847-9470
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3727-043X>
ResearcherID: X-1461-2019
Scopus Author ID: 7005885252

Поступила 26.07.2024
После рецензирования 15.09.2024
Принята 29.10.2024

Received 26.07.2024
Revised 15.09.2024
Accepted 29.10.2024