

Спутниковый мониторинг состояния оазисов реки Амударьи в период 2003–2020 гг. на основе анализа эффекта охлаждения территорий в результате их ирригации

А. Г. Терехов^{1,2}, Н. Н. Абаев^{2,3}, Ю. А. Маглинец⁴

¹ *Институт информационных и вычислительных технологий
Алматы, 050010, Казахстан
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

² *РГП «Казгидромет», Алматы, 050022, Казахстан
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

³ *Казахский национальный университет имени аль-Фараби
Алматы, 050040, Казахстан
E-mail: abayev.nurlan@gmail.com*

⁴ *Институт космических и информационных технологий СФУ
Красноярск, 660074, Россия
E-mail: maglinets@mail.ru*

Река Амударья со среднегодовым стоком в 62 км^3 — крупнейшая река Центральной Азии. Её сток практически полностью разбирается на полив сельскохозяйственных угодий, что привело к деградации Аральского моря в последние десятилетия. Естественная межгодовая вариативность в объёмах речного стока Амударьи, недостаточная техническая оснащённость системы регионального гидрологического мониторинга и противоречия в экономических интересах стран региона затрудняют организацию эффективного водопользования в бассейне этой трансграничной реки. Одной из существующих проблем является недостаток объективной информации об уровне водообеспеченности различных массивов поливной пашни в странах региона. Список объективных спутниковых продуктов, характеризующих состояние поливного земледелия в оазисах р. Амударьи, может быть расширен за счёт температуры подстилающей поверхности (*англ.* Land Surface Temperature — LST). Ирригация пашни приводит к её охлаждению. Величина этого эффекта (*англ.* Irrigation Cooling Effect — ICE) может выступать в качестве параметра, характеризующего водообеспеченность сельскохозяйственных оазисов. Для мониторинга величин ICE для территорий наиболее крупных оазисов на р. Амударье использовался декадный продукт LST-C6 FEWS NET (май–сентябрь 2003–2020 гг.). Было рассмотрено три оазиса: Мервский (Мургабский), Тедженский и Хорезмский. Первые два оазиса обводняются в основном за счёт Каракумского канала, берущего начало в среднем течении р. Амударьи. Хорезмский оазис расположен в низовьях Амударьи. Анализ средних по оазису значений ICE в период июнь–июль для сезонов 2003–2020 гг. показал, что существует тесная скоординированность между режимами Мервского и Тедженского оазисов. Коэффициент корреляции Пирсона составил 0,76. При этом скоординированность состояний между Хорезмским оазисом нижнего течения р. Амударьи и оазисами среднего течения довольно низка, коэффициент корреляции Пирсона равен 0,34. Это указывает на неэффективность существующих международных механизмов водodelения речного стока, поскольку естественные вариации в объёмах стока Амударьи не приводят к согласованным изменениям величин ICE в оазисах реки. Диагностика уровня скоординированности между состояниями оазисов среднего и нижнего течения р. Амударьи с помощью корреляционного анализа в плавающих временных окнах (8, 10, 12, 14 лет) показала отсутствие прогресса в системе водodelения в период 2003–2020 гг.

Ключевые слова: поливная пашня, спутниковая термография, многолетний мониторинг, эффект охлаждения пашни при ирригации, вариативность стока реки, недостаток поливной воды, оценка распределения воды, доступность воды в оазисе

Одобрена к печати: 02.09.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132

Введение

Центральная Азия характеризуется климатическим дефицитом увлажнения. Сток крупнейших рек региона — Сырдарьи (23 км³) и Амударьи (62 км³) — практически полностью разбивается на полив сельскохозяйственных культур. В течение последних десятилетий эта ситуация привела к экологической катастрофе, деградации конечного водного объекта этих рек — Аральского моря. Площадь его зеркала уменьшилась с 67,6 тыс. км² (1960) до 8,3 тыс. км² (2015). Море разделилось на несколько устойчивых водоёмов, из которых наиболее заметен Малый Арал, куда впадает р. Сырдарья (Gadaev, Yasakov, 2012). Река Амударья в маловодные и средние по водности годы практически не доходит до Аральского моря. Основная часть воды разбирается на ирригацию и на поддержание существования системы пресных озёр в дельте реки.

После распада СССР территория бассейна Аральского моря стала относиться к пяти постсоветским государствам: Казахстану, Кыргызстану, Таджикистану, Туркменистану и Узбекистану. Экологическая и экономическая ситуация в бассейне Аральского моря в Центральной Азии остаётся критической (Conrad et al., 2020; Micklin, 2016). Неправильное управление водными ресурсами, загрязнение, быстрый рост населения и связанные с водой экономические и экологические проблемы стали основными в бассейне Аральского моря, расположенном в полупустынных и пустынных районах Центральной Азии (Martius et al., 2004). Повышенные уровни грунтовых вод и связанное с этим вторичное засоление поливной пашни типичны для всех стран региона (Matchanov et al., 2016; Qadir et al., 2009). Ветхая ирригационная и дренажная инфраструктура, низкая эффективность водопользования затрудняют устойчивое сельскохозяйственное производство (Bobojonov et al., 2013). Избыточный забор пресной воды из рек вызывает диспропорции между верховьями и низовьями, что угрожает природным экосистемам (Libert, Lipponen, 2012).

Система коллективного водопользования стран, входящих в бассейн этих рек, администрируется Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссией (МКВК, http://icwc-aral.uz/index_ru.htm), объединяющей Казахстан, Киргизию, Таджикистан, Узбекистан и Туркмению. МКВК определяет национальные лимиты объёмов водопользования трансграничных речных ресурсов (рек Сырдарьи и Амударьи). Однако проблемы взаимодействия водопотребителей верхнего, среднего и нижнего течения этих рек остаются весьма большими, что особенно проявляется в маловодные и средние годы. В немалой степени этому содействуют неразвитость и низкая техническая оснащённость системы гидрологического мониторинга, особенно в бассейне р. Амударьи (Chemin et al., 2004). Равнинная, средняя и нижняя части бассейна Амударьи характеризуются сложной гидрологией. Река переносит большое количество взвешенного материала и активно меандрирует.

В таких условиях востребовано развитие объективных инструментов по оценке водообеспеченности поливной пашни на основе спутниковых данных. Стандартный подход к оценке водообеспеченности культурной растительности базируется на моделировании водного баланса (Conrad et al., 2007) либо анализе вегетационных индексов (см., например, работу (Терехов и др., 2020а)). В данной работе развиваются подходы использования спутниковой термографии для сравнительной оценки состояния крупных массивов поливной пашни (оазисов) в бассейне р. Амударьи.

Территория обследования

В настоящей работе рассмотрено состояние трёх наиболее крупных сельскохозяйственных оазисов трансграничной р. Амударьи. Это Мервский (Мургабский) с площадью в 5,2 тыс. км², Тедженский (6,4 тыс. км²) и Хорезмский (27,2 тыс. км²) оазисы. Первые два оазиса относятся к Туркменистану и обводняются в основном за счёт Каракумского канала, берущего начало в среднем течении Амударьи. Хорезмский оазис расположен в низовьях Амударьи, часть его относится к Узбекистану, часть — к Туркменистану (рис. 1, см. с. 125).



Рис. 1. Карта-схема бассейна р. Амударьи с границами трёх анализируемых оазисов

В бассейне Аральского моря основные возделываемые культуры на поливной пашне — хлопок и пшеница. Избежать огромных потерь воды от испарения можно использованием капельного орошения. Однако высокая стоимость первоначальной установки и возможность повреждения поливных труб в результате замерзания воды в холодный период ограничивают распространение данной технологии. Поэтому полив бороздами, который оказывается одним из наиболее дешёвых, но и наименее эффективных методов орошения, по-прежнему популярен здесь. В результате до 99 % всей поливной пашни в странах Центральной Азии орошается таким образом (Woznicki, Nejadhashemi, 2014).



Рис. 2. Сцена LST FEWS NET на 2-ю декаду июля 2020 г. с границами анализируемых оазисов и некоторыми картографическими обозначениями

Исходные данные

Спутниковый продукт LST (*англ.* Land Surface Temperature) MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) использовался для характеристики средней температуры поверхности Земли для территории анализируемых оазисов. Облачный покров вносит значительные искажения в регистрируемую температуру. Поэтому используются различные продукты, представляющие собой данные, накопленные в некотором временном окне. В этом исследовании мы привлекали к анализу сцены LST FEWS NET (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/ewx/index.html?region=casia>), представляющие собой продукт с декадным обновлением и пространственным разрешением 5 км (*рис. 2*, см. с. 125). Имеющийся архив данных FEWS NET позволил проанализировать 18 сезонов (2003–2020). Каждый сезон характеризовался периодом с мая по сентябрь (15 сцен в год).

Методика обработки данных

Тепловая съёмка использовалась для характеристики поливных культур в странах Центральной Азии, в частности в задачах оценки засоления (Ivushkin et al., 2017). Более информативным параметром представляется не сама LST-температура, а разница температур между поливной пашней и окружающей территорией — так называемый эффект охлаждения пашни из-за ирригации (*англ.* Irrigation Cooling Effect — ICE), который ранее использовался в климатических исследованиях (Bamston, Schickedanz, 1986; Han, Yang, 2013; Yang et al., 2020). В последнее время ICE-эффект применялся для оценки водообеспеченности поливных культур (Терехов, 2020; Terekhov, Abayev, 2020).

В течение сезона величина ICE поливной пашни Центральной Азии меняется, достигая максимальных значений на 2–3-ю декаду июля (Терехов, 2020). В качестве характеристики сезона для каждого из трёх рассматриваемых оазисов использовалось среднее значение ICE по шести сценам, 1–3-я декады июня и 1–3-я декады июля (*рис. 3*, см. с. 127). При прочих равных условиях, чем лучше водообеспечение пашни, тем больше испарение воды и выше значения ICE. Водность р. Амударьи значительно меняется год от года. Вариативность годового стока составляет примерно от 50 до 100 км³/год. В зависимости от сезонной водности реки меняется количество доступной для ирригации воды и, соответственно, значения ICE для сельскохозяйственных оазисов. В условиях маловодья либо среднего года уровень водообеспеченности поливной пашни среднего течения Амударьи (оазисы Мервский и Тедженский) может существенно отличаться от условий в нижнем течении (Хорезмский оазис). Это обстоятельство позволяет проводить сравнительный анализ и диагностировать согласованность изменений значений ICE между оазисами среднего и нижнего течения реки. При корректном распределении лимитов водопользования между странами речного бассейна (Туркменистан, Узбекистан) и соблюдении этих квот ожидалось, что водообеспеченность поливной пашни не должна сильно зависеть от географической позиции поливного массива (среднее или нижнее течение Амударьи). То есть дефицит воды в нижнем течении должен быть следствием её дефицита и в среднем. Однако водопользование в трансграничных речных бассейнах в условиях климатического дефицита воды почти всегда сопровождается «экспортом» маловодья в нижние части бассейна. Страны и водопользователи верхних частей речных бассейнов имеют географическое преимущество в доступе к воде, которым они практически всегда пользуются.

Для сопоставления условий водообеспеченности поливной пашни среднего и нижнего течения р. Амударьи ежегодно рассчитывалось среднее значение ICE в период июнь — июль для Мервского и Тедженского оазисов, которое сравнивалось с соответствующим значением ICE для Хорезмского оазиса. Сравнение проводилось в рамках линейно-корреляционного подхода, в котором значение коэффициента корреляции Пирсона выступало в качестве количественной меры согласованности между этими рядами данных (2003–2020).

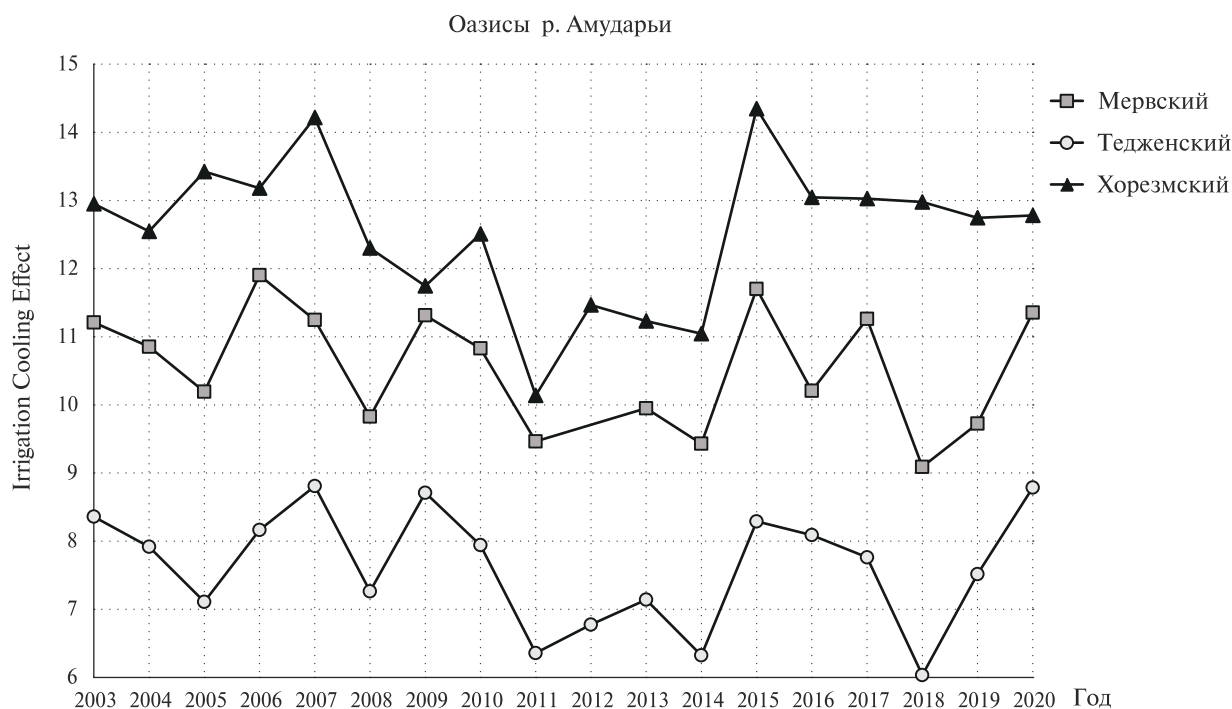


Рис. 3. Динамика средних (июнь – июль) значений ICE для анализируемых оазисов в бассейне р. Амударьи в период 2003–2020 гг. Построено на основе данных LST FEWS NET

Наличие 18-летнего ряда наблюдений давало возможность оценить многолетнюю динамику изменений в системе международного водodelения ресурсов р. Амударьи. Плавающие временные окна шириной 8, 10, 12 и 14 лет позволяли формировать временные ряды из значений коэффициентов корреляции Пирсона между величинами ICE оазисов среднего и нижнего течения и, таким образом, характеризовать изменения коррелированности водообеспечения между пашней среднего и нижнего течения Амударьи во времени. Что, в свою очередь, прямо связано с эффективностью системы международного водodelения в период 2003–2020 гг. в бассейне реки.

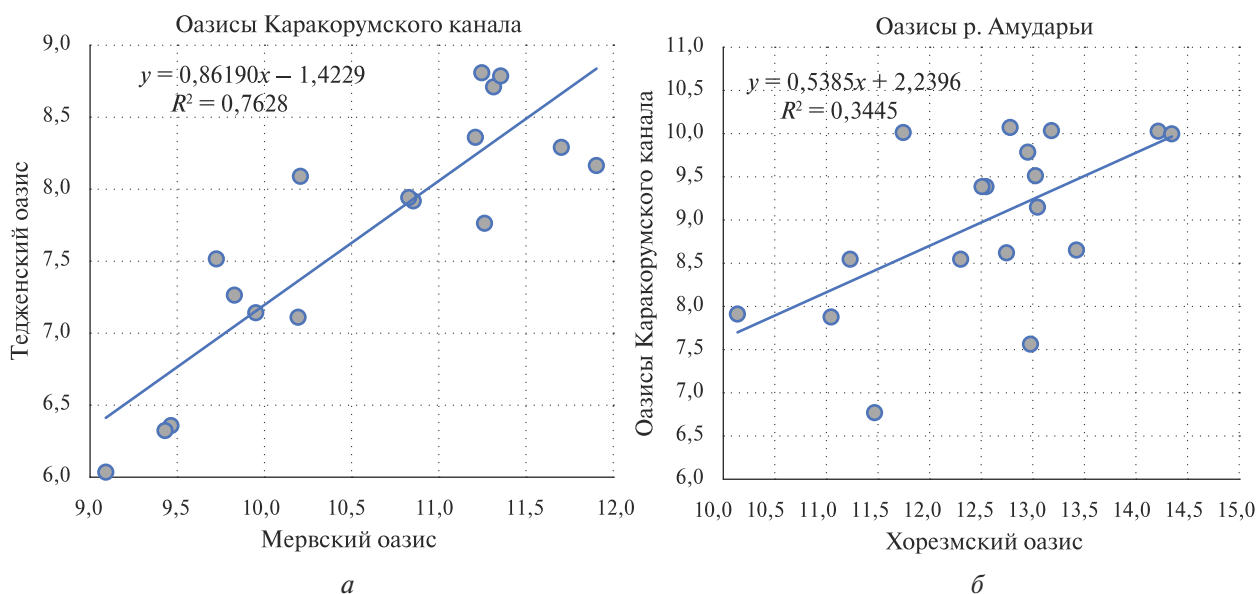


Рис. 4. Взаимосвязь между значениями ICE оазисов р. Амударьи в период 2003–2020 гг.: а — оазисы среднего течения реки: Мервский против Тедженского; б — оазисы нижнего и среднего течения: Хорезмский против Мервского с Тедженским. Построено на основе данных LST FEWS NET

Полученные результаты

Многолетний (2003–2020) мониторинг летних средних (июнь–июль) значений ICE для трёх анализируемых оазисов в бассейне р. Амударьи представлен на *рис. 3*. Анализ согласованности величин ICE между оазисами среднего и нижнего течения реки отображён на *рис. 4* (см. с. 127). Изменения согласованности значений ICE в период 2003–2020 гг. для различных временных окон (8, 10, 12, 14 лет) показаны на *рис. 5*.

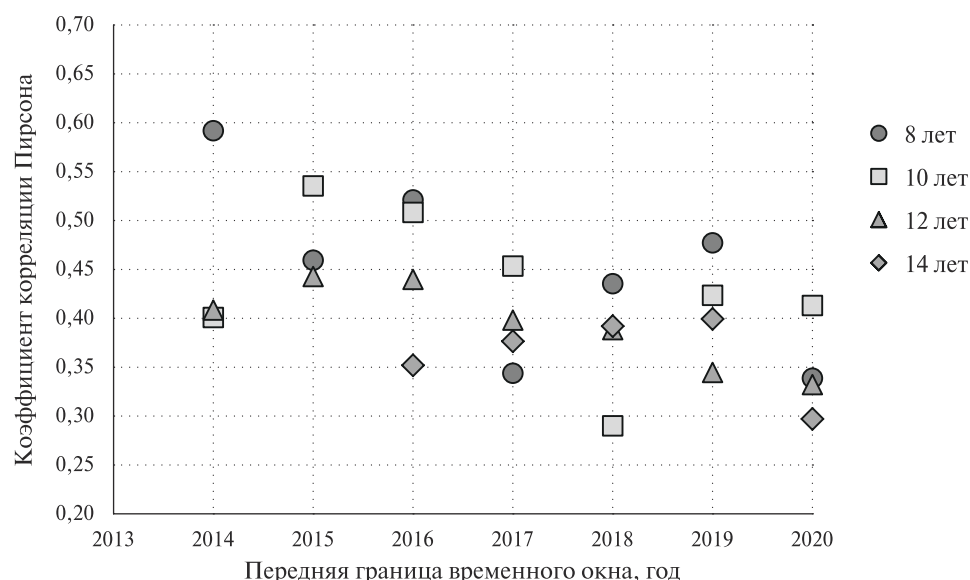


Рис. 5. Значения коэффициентов корреляции Пирсона для временных окон в ряде: ICE — пашня нижнего течения против ICE — пашня среднего течения, период 2003–2020 гг.

Обсуждение

Среднее за июнь–июль значение ICE для территории оазиса зависит от водообеспеченности сельскохозяйственных угодий. Наиболее значимым фактором становится количество доступной для ирригации воды. Определённое влияние также оказывает технология полива и температура воздуха. В условиях более жаркой погоды величины ICE несколько увеличиваются, что сопровождается ростом количества поверхностных вод, затраченных на испарение. В условиях относительных низких температур (весна и осень) большая доля воды, доставляемой ирригационной системой к поверхности почвы, фильтруется и уходит в грунтовые воды. Сельскохозяйственная практика в бассейне р. Амударьи достаточно стабильна и не претерпевала коренных изменений в период мониторинга 2003–2020 гг.

Таким образом, предполагалось, что для условий стран Центральной Азии в бассейне р. Амударьи величина ICE (июнь–июль) в первую очередь отражает эффективность ирригации поливной пашни. Первым значимым фактором оказывается количество ирригационных вод. Погодный фактор в аспекте температурного режима воздуха тоже имеет значение. Однако анализируемые оазисы находятся относительно недалеко друг от друга (около 1000 км) в равнинной зоне пустынь Средней Азии — Каракумы и Кызылкум, примыкающих к горам Памиро-Алая. Соответственно, сезонные температурные режимы близки.

Полученные результаты по согласованности значений ICE между рассматриваемыми оазисами в период 2003–2020 гг. показывают, что оазисы среднего течения р. Амударьи — Мервский и Тедженский — имеют неплохую согласованность между собой, коэффициент корреляции Пирсона равен 0,76 (см. *рис. 3, 4а*). Очевидно, администрирование ирригационными режимами двух соседних оазисов в рамках одной страны, несмотря на наличие нескольких источников воды: Каракумский канал, локальные реки Мургаб и Теджен, обеспечивает

близкие условия водообеспеченности поливной пашни, что отражается в коррелированности значений ICE. Сравнение значений ICE между поливной пашней нижнего и среднего течений р. Амударьи (см. *рис. 4б*) указывает на значительно более слабую коррелированность, коэффициент корреляции Пирсона — 0,34. Столь низкая согласованность говорит об отсутствии в бассейне Амударьи эффективных механизмов соблюдения национальных квот водопотребления, и дефицит воды в годы маловодья и средних условий имеет разную остроту в среднем и нижнем течениях реки.

Население бассейна Аральского моря растёт. Эффективность сельскохозяйственного водопотребления в сравнении с другими странами достаточно низка. Остро стоят проблемы Аральского моря. Особенности атмосферной циркуляции (Терехов и др., 2020б; Terekhov et al., 2020), изменений в распределении снежного покрова в горах Евразии (Терехов, Макаренко, 2020) и изменение климата (Didovets et al., 2021; Luo et al., 2019) также вносят свой вклад в изменения водного потенциала региона. На фоне этих факторов особый интерес представляет диагностика многолетних изменений в эффективности администрирования водопользования в трансграничном бассейне р. Амударьи через механизмы МКВК. Имеет ли место прогресс в эффективности международного использования речных ресурсов р. Амударьи или нет?

Исходный 18-летний (2003–2020) ряд значений ICE достаточен, чтобы с помощью техники плавающих временных окон (ширина 8, 10, 12, 14 лет) получить информацию о тенденциях в изменении уровня коррелированности между значениями ICE поливной пашни среднего и нижнего течения р. Амударьи. Значения коэффициентов корреляции Пирсона для всего набора временных окон представлены на *рис. 5*. Рассматривая результаты коррелированности по ходу временной оси, можно отметить отсутствие прогресса. Улучшение ситуации должно было бы сопровождаться ростом значений коэффициентов корреляции Пирсона. Фактически регистрируется слабо выраженное ухудшение (см. *рис. 5*).

Заключение

Спутниковая термография оазисов Центральной Азии в формате анализа эффекта охлаждения территории из-за её ирригации позволяет получать информацию об эффективности водопользования в крупных трансграничных речных бассейнах. Для бассейна р. Амударьи обнаружена низкая коррелированность (коэффициент корреляции Пирсона — 0,34) между значениями ICE среднего и нижнего течения (Мервский и Тедженский оазисы против Хорезмского оазиса). Данный результат указывает на существующие проблемы водodelения в бассейне этой трансграничной реки. Недостаток водных ресурсов в маловодные и средние сезоны вызывает элементы засушливости различной интенсивности, которые в большей степени зависят не от водности сезона, а от расположения ирригационных водозаборов (среднее либо нижнее течение Амударьи). 18-летний мониторинг сезонных значений ICE позволил провести диагностику изменений условий водопользования в бассейне р. Амударьи. Анализ значений коэффициентов корреляции Пирсона для временных окон 8, 10, 12, 14 лет в пределах периода наблюдения 2003–2020 гг. не показал наличие прогресса, эти значения не имели тенденции на увеличение в последние годы.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проекты № AP09562387 и BR10965172.

Литература

1. Терехов А. Г. 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. 2020. Т. 17. № 7. С. 131–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-131-141.

2. Терехов А. Г., Макаренко Н. Г. Морфологический анализ аномалий пространственного распределения весенних запасов снега в горных территориях Евразии в период 2001–2019 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 243–254. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-243-254.
3. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Лагутин Е. И. (2020а) Диагностика водообеспеченности сельскохозяйственных культур СУАР КНР в течение 2003–2019 гг. по данным eMODIS NDVI C6 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 128–138. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-128-138.
4. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Витковская И. С., Пак А. А., Егембердиева З. М. (2020б) О связи между состоянием горной растительности Тянь-Шаня и индексами Северо-Атлантической Осцилляции в весенне-летний период следующего года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 275–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-275-281.
5. Bobojonov I., Lamers J. P. A., Bekchanov M., Djanibekov N., Franz-Vasdeki J., Ruzimov J., Martius C. Options and constraints for crop diversification: A case study in sustainable agriculture in Uzbekistan // Agroecology and Sustainable Food Systems. 2013. V. 37. No. 7. P. 788–811. DOI: 10.1080/21683565.2013.775539.
6. Chemin Y., Platonov A., Ul-Hassan M., Abdullaev I. Water depletion assessment at administrative and irrigation levels: Case Study of Ferghana Province using public remote sensing data // Agricultural Water Management. 2004. V. 64. No. 3. P. 183–196.
7. Conrad Ch., Dech S. W., Hafeez M., Lamers J., Martius Ch., Strunz G. Mapping and assessing water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products // Irrigation and Drainage Systems. 2007. V. 21. No. 3–4. P. 197–218. DOI: 10.1007/s10795-007-9029-z.
8. Conrad Ch., Usman M., Morper-Busch L., Schönbrodt-Stitt S. Remote sensing-based assessments of land use, soil and vegetation status, crop production and water use in irrigation systems of the Aral Sea Basin: A review // Water Security. 2020. V. 11. Art. No. 100078. DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100078.
9. Didovets I., Lobanova A., Krysanova V., Menz Ch., Babagalieva Z., Nurbatsina A., Gavrilenko N., Khamidov V., Umirbekov A., Qodirov S., Muhyyew D., Hattermann F. F. Central Asian rivers under climate change: Impact's assessment in eight representative catchments // J. Hydrology: Regional Studies. 2021. V. 34. Art. No. 100779. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100779.
10. Gadaev A., Yasakov Z. An Overview of the Aral Sea Disaster // Disaster by Design: The Aral Sea and its Lessons for Sustainability (Research in Social Problems and Public Policy, V. 20: Maps of Uzbekistan and the Greater Aral Sea Region) / eds. Edelstein M. R., Cerny A., Gadaev A. Bingley: Emerald Group Publishing Limited, 2012. P. 5–15. DOI: 10.1108/S0196-1152(2012)0000020009.
11. Ivushkin K., Bartholomeus H., Bregt A. K., Pulatov A. Satellite thermography for soil salinity assessment of cropped areas in Uzbekistan // Land Degradation and Development. 2017. V. 28. P. 870–877. DOI: 10.1002/ldr.2670.
12. Libert B., Lipponen A. Challenges and opportunities for transboundary water cooperation in Central Asia: Findings from UNECE's regional assessment and project work // Intern. J. Water Resources Developpment. 2012. V. 28. No. 3. P. 565–576. DOI: 10.1080/07900627.2012.684527.
13. Luo M., Liu T., Meng F., Duan Y., Bao A., Frankl A., De Maeyer P. Spatiotemporal characteristics of future changes in precipitation and temperature in Central Asia // Intern. J. Climatology. 2019. V. 39. Iss. 3. P. 1571–588. DOI: 10.1002/joc.5901.
14. Martius C., Lamers J. P. A., Wehrheim P., Schoeller-Schletter A., Eshchanov R., Tupitsa A., Khamzina A., Akramkhanov A., Vlek P. L. G. Developing sustainable land and water management for the Aral Sea Basin through an interdisciplinary research // Water in agriculture: Proc. ACIAR / eds. Seng V., Craswell E., Fukai S. Canberra, Australia, 2004. No. 116. P. 45–60.
15. Matchanov M., Teodoro A., Schroder C. Criterion definition for the identification of physical-geographical boundaries of Khorezm Oasis through remotely sensed data // Environmental Monitoring and Assessment. 2016. V. 188. No. 1. Art. No. 35. 14 p. DOI: 10.1007/s10661-015-5035-z.
16. Micklin P. The future Aral Sea: Hope and despair // Environmental Earth Sciences. 2016. V. 75. No. 9. Art. No. 844. 15 p. DOI: 10.1007/s12665-016-5614-5.
17. Qadir M., Noble A. D., Qureshi A. S., Gupta R. K., Yuldashev T., Karimov A. Salt induced land and water degradation in the Aral Sea Basin: A challenge to sustainable agriculture in Central Asia // Natural Resources Forum. 2009. V. 33. No. 2. P. 134–149. DOI: 10.1111/j.1477-8947.2009.01217.x.
18. Terekhov A., Abayev N. Irrigation cooling effect: opportunities in task of estimation of international irrigation water usage in transboundary River Syrdarya basin, Central Asia // E3S Web Conf. 2020. V. 223. Art. No. 02009. DOI: 10.1051/e3sconf/202022302009.
19. Terekhov A. G., Vitkovskaya I. S., Abayev N. N. The effect of changing stratification in the atmosphere in central zone of Eurasia according to vegetation data of Tien Shan mountains during 2002–2019 // E3S Web Conf. 2020. V. 149. Art. No. 03004. DOI: 10.1051/e3sconf/202014903004.
20. Woznicki S. A., Nejadhashemi A. P. Assessing uncertainty in best management practice effectiveness under future climate scenarios // Hydrological Process. 2014. V. 28. P. 2550–2566. DOI: 10.1002/hyp.9804.

Satellite monitoring of River Amu Darya oases during 2003–2020 based on irrigation cooling effect

A. G. Terekhov^{1,2}, N. N. Abayev^{2,3}, Yu. A. Maglinets⁴

¹ *Institute of Information and Computing Technology, Almaty 050010, Kazakhstan*
E-mail: aterekhov1@yandex.ru

² *RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan*
E-mail: aterekhov1@yandex.ru

³ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan*
E-mail: abayev.nurlan@gmail.com

⁴ *SibFU Institute of Space and Information Technologies, Krasnoyarsk 660074, Russia*
E-mail: maglinets@mail.ru

The Amu Darya River, with an average annual outflow of 62 km³, is the largest river in Central Asia. Its runoff is almost completely diverted to cropland irrigation, which has led to the catastrophic Aral Sea degradation. Interannual variability in River Amu Darya outflow, insufficient technical equipment of the regional hydrological monitoring system and contradictions in the economic interests of the regional countries make it difficult to organize effective water use in this transboundary river basin. One of the existing river's basin problems is the deficit of objective information about the irrigated cropland state. The list of satellite products that characterize the irrigation agriculture state in Amu Darya River oases can be expanded by the Land Surface Temperature (LST). Irrigation of arable land leads to its cooling — irrigation cooling effect (ICE). The ICE value can act as a parameter that characterizes the water availability of agricultural oases. The product LST FEWS NET (May–September) with ten days renew was used to monitor ICE values for the oasis's territories in the Amu Darya River basin during 2003–2020. Three oases have been considered: Merv (Murghab), Tejen and Khorezm. The first two oases are watered mainly by the Karakum Canal, which originates in the middle reaches of the Amu Darya River. The Khorezm oasis is located in the lower river's reaches. Analysis of the average ICE values for the oasis in the period June–July for the seasons 2003–2020 has shown that there is a close coherence between the regimes of the Merv and Tejen oases. Pearson's correlation coefficient was 0.76. At the same time, the coherence of states between the Khorezm oasis of the lower course of the Amu Darya River and the oases of the middle course is quite low, the Pearson correlation coefficient is 0.34. This indicates the inefficiency of the international mechanisms of water distribution of river runoff. We see that natural seasonal fluctuations in the Amu Darya River outflow do not lead to coherent changes in the ice values in all the oases under consideration. Diagnostics of the coherent level between the oasis state of the middle and lower reaches of the Amu Darya River using correlation analysis in floating time windows (8, 10, 12, 14 years) showed no progress in the international water allocation system during 2003–2020.

Keywords: irrigated arable land, satellite thermography, multi-year monitoring, irrigation cooling effect, variability of river runoff, limitation of irrigation water, assessing water distribution, water availability in oases

Accepted: 02.09.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132

References

1. Terekhov A. G., Satellite estimation of agriculture water availability using the 2002–2019 irrigation cooling effect over Xinjiang, Northwest China, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 131–141 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-131-141.
2. Terekhov A. G., Makarenko N. G., Morphological analysis of snow deposit distribution in Eurasian mountain land during 2001–2019, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 243–254 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-243-254.
3. Terekhov A. G., Abayev N. N., Lagutin E. I. (2020a), Diagnostics of water availability for agricultural crops in Xinjiang (China) in 2003–2019 based on eMODIS NDVI C6 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 128–138 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-128-138.

4. Terekhov A. G., Abayev N. N., Vitkovskaya I. S., Pak A. A., Yegemberdyeva Z. M. (2020b), Links between the vegetation state over Tien-Shan mountains and North Atlantic Oscillation indices of the upcoming season, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 275–281 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-275-281.
5. Bobojonov I., Lamers J. P. A., Bekchanov M., Djanibekov N., Franz-Vasdeki J., Ruzimov J., Martius C., Options and constraints for crop diversification: A case study in sustainable agriculture in Uzbekistan, *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 2013, Vol. 37, No. 7, pp. 788–811, DOI: 10.1080/21683565.2013.775539.
6. Chemin Y., Platonov A., Ul-Hassan M., Abdullaev I., Water depletion assessment at administrative and irrigation levels: Case Study of Ferghana Province using public remote sensing data, *Agricultural Water Management*, 2004, Vol. 64, No. 3, pp. 183–196.
7. Conrad Ch., Dech S. W., Hafeez M., Lamers J., Martius Ch., Strunz G., Mapping and assessing water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products, *Irrigation and Drainage Systems*, 2007, Vol. 21, No. 3–4, pp. 197–218, DOI: 10.1007/s10795-007-9029-z.
8. Conrad Ch., Usman M., Morper-Busch L., Schönbrodt-Stitt S., Remote sensing-based assessments of land use, soil and vegetation status, crop production and water use in irrigation systems of the Aral Sea Basin: A review, *Water Security*, 2020, Vol. 11, 100078, DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100078.
9. Didovets I., Lobanova A., Krysanova V., Menz Ch., Babagaliyeva Z., Nurbatsina A., Gavrilenko N., Khamidov V., Umirbekov A., Qodirov S., Muhyiyev D., Hattermann F. F., Central Asian rivers under climate change: Impact's assessment in eight representative catchments, *J. Hydrology: Regional Studies*, 2021, Vol. 34, Art. No. 100779, DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100779.
10. Gadaev A., Yasakov Z., An Overview of the Aral Sea Disaster, In: *Disaster by Design: The Aral Sea and its Lessons for Sustainability (Research in Social Problems and Public Policy, Vol. 20: Maps of Uzbekistan and the Greater Aral Sea Region)*, Edelstein M. R., Cerny A., Gadaev A. (eds.), Bingley: Emerald Group Publishing Limited, 2012, pp. 5–15, DOI: 10.1108/S0196-1152(2012)0000020009.
11. Ivushkin K., Bartholomeus H., Bregt A. K., Pulatov A., Satellite thermography for soil salinity assessment of cropped areas in Uzbekistan, *Land Degradation and Development*, 2017, Vol. 28, pp. 870–877, DOI: 10.1002/ldr.2670.
12. Libert B., Lipponen A., Challenges and opportunities for transboundary water cooperation in Central Asia: Findings from UNECE's regional assessment and project work, *Intern. J. Water Resources Development*, 2012, Vol. 28, No. 3, pp. 565–576, DOI: 10.1080/07900627.2012.684527.
13. Luo M., Liu T., Meng F., Duan Y., Bao A., Frankl A., De Maeyer P., Spatiotemporal characteristics of future changes in precipitation and temperature in Central Asia, *Intern. J. Climatology*, 2019, Vol. 39, Issue 3, pp. 1571–1588, DOI: 10.1002/joc.5901.
14. Martius C., Lamers J. P. A., Wehrheim P., Schoeller-Schletter A., Eshchanov R., Tupitsa A., Khamzina A., Akramkhanov A., Vlek P. L. G., Developing sustainable land and water management for the Aral Sea Basin through an interdisciplinary research, *Water in agriculture: Proc. ACIAR*, Seng V., Craswell E., Fukai S. (eds.), Canberra, Australia, 2004, No. 116, pp. 45–60.
15. Matchanov M., Teodoro A., Schroder C., Criterion definition for the identification of physical-geographical boundaries of Khorezm Oasis through remotely sensed data, *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, Vol. 188, No. 1, Art. No. 35, 14 p., DOI: 10.1007/s10661-015-5035-z.
16. Micklin P., The future Aral Sea: Hope and despair, *Environmental Earth Sciences*, 2016, Vol. 75, No. 9, Art. No. 844, 15 p., DOI: 10.1007/s12665-016-5614-5.
17. Qadir M., Noble A. D., Qureshi A. S., Gupta R. K., Yuldashev T., Karimov A., Salt induced land and water degradation in the Aral Sea Basin: A challenge to sustainable agriculture in Central Asia, *Natural Resources Forum*, 2009, Vol. 33, No. 2, pp. 134–149, DOI: 10.1111/j.1477-8947.2009.01217.x.
18. Terekhov A., Abayev N., Irrigation cooling effect: opportunities in task of estimation of international irrigation water usage in transboundary River Syrdarya basin Central Asia, *E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 223, Art. No. 02009, DOI: 10.1051/e3sconf/202022302009.
19. Terekhov A. G., Vitkovskaya I. S., Abayev N. N., The effect of changing stratification in the atmosphere in central zone of Eurasia according to vegetation data of Tien Shan mountains during 2002–2019, *E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 149, Art. No. 03004, DOI: 10.1051/e3sconf/202014903004.
20. Woznicki S. A., Nejadhashemi A. P., Assessing uncertainty in best management practice effectiveness under future climate scenarios, *Hydrological Process*, 2014, Vol. 28, pp. 2550–2566, DOI: 10.1002/hyp.9804.