

# Спутниковая диагностика изменений сельскохозяйственного водообеспечения Синьцзян-Уйгурского автономного района КНР на основе эффекта охлаждения поверхности пашни при ирригации по данным 2002–2019 гг.

А. Г. Терехов

*Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК*

*Алматы, 050010, Казахстан*

*E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

*Республиканское государственное предприятие «Казгидромет»*

*Алматы, 050022, Казахстан*

*E-mail: terekhov\_a@meteo.kz*

Ирригация в аридном климате существенно снижает поверхностную температуру (*англ.* Land Surface Temperature — LST) поливной пашни (*англ.* Irrigation Cooling Effect — ICE). Многолетние изменения значений ICE использовались для диагностики изменений водообеспеченности сельскохозяйственных массивов, расположенных в бассейнах четырёх рек Синьцзян-Уйгурского автономного р-на (СУАР) Китайской Народной Республики (КНР): Халык-Гол (Таримская впадина), Боло-Тала, Куйтунь и Манас (Джунгарская равнина). В работе использовался декадный спутниковый продукт LST FEWS NET периода апрель–сентябрь 2002–2019 гг. с пространственным разрешением 5 км, основанный на MOD11 LST. Усреднённые сезонные максимумы ICE периода 2002–2019 гг. для сельскохозяйственных массивов бассейнов рек составили: для р. Халык-Гол — 12,2 К, р. Боло-Тала — 8,1 К, р. Манас — 12,5 К, р. Куйтунь — 13,2 К. Многолетний мониторинг ICE в течение апреля–сентября показал, что взятый в качестве эталона сельскохозяйственный массив в бассейне р. Хылык-Гол (Таримская впадина), обеспеченный собственными водными ресурсами, имел стабильный режим с незначительной тенденцией на уменьшение в мае–июне. В Джунгарской равнине в период июль–август регистрировался рост ICE. Скорость роста ICE на первую декаду июля составила: в бассейне р. Боло-Тала — 2,6 К/10 лет (коэффициент детерминации 0,66); в бассейне р. Куйтунь — 2,7 К/10 лет (0,71); в бассейне р. Манас — 3,2 К/10 лет (0,79). Таким образом, регистрируется улучшение водообеспечения сельскохозяйственных культур в Джунгарской равнине СУАР КНР. Бассейны рек Манас и Куйтунь находятся в зоне влияния воднотранспортной инфраструктуры р. Чёрный Иртыш–Джунгарская равнина (Чёрный Иртыш–Карамай и Чёрный Иртыш–Урумчи), что, по всей видимости, обеспечивает улучшение ирригации за счёт водных ресурсов трансграничной р. Чёрный Иртыш.

**Ключевые слова:** поливная пашня, температура поверхности земли, эффект охлаждения поверхности поливной пашни, многолетний мониторинг, MOD11, LST C6 FEWS NET, водообеспеченность пашни, многолетние тренды

Одобрена к печати: 22.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-131-141

## Введение

Аридный климат и растущее потребление воды в Центральной Азии создают проблему региональной водной безопасности. Одна из её важных частей относится к водodelению трансграничных речных ресурсов, в частности стока р. Чёрный Иртыш. Верховья реки относятся к Синьцзян-Уйгурскому автономному р-ну (СУАР) Китайской Народной Республики (КНР), а нижележащая часть — к Казахстану. Экономическое развитие СУАР идёт быстрыми темпами. Построены магистральные каналы межбассейновой переброски воды Чёрный Иртыш–Карамай (1999), Чёрный Иртыш–Урумчи (2007). С их помощью водные ресурсы трансграничной р. Чёрный Иртыш используются для различных нужд, в том числе и для ирригации пашни во внутренних территориях Джунгарской равнины, отличающейся исключительно сухим и жарким климатом.

При ограниченных водных ресурсах сельскохозяйственное производство требует использования водосберегающих технологий. Один из очевидных индикаторов сельскохозяйственного водопотребления территорий — площадь поливных земель, а также динамика её изменений. Для Казахстана как страны нижней части бассейна трансграничной реки в условиях регионального климатического дефицита воды большой интерес представляет объективная информация о сельскохозяйственном водопотреблении в СУАР, особенно в части, касающейся безвозвратного водозабора трансграничных речных ресурсов во внутренние районы.

Данные дистанционного зондирования предоставляют широкие возможности регистрации различных параметров, связанных с поливным земледелием (Якушев и др., 2019). Поливное земледелие в аридном климате значительно меняет спектральные характеристики поверхности земли. Появляется развитый растительный покров с закономерной сезонной динамикой. Многолетний мониторинг вегетационных индексов позволяет судить об изменениях площадей посевов и даёт информацию об изменениях водопотребления в предположении о стабильности норм полива (Терехов и др., 2020а). Однако в процессе адаптации сельского хозяйства к климатическому дефициту воды нормы полива со временем могут изменяться.

Распределение воды по поверхности почвы пашни в рамках ирригационных мероприятий приводит к развитию растительности. Этот процесс сопровождается эвапотранспирацией и снижением поверхностной температуры (*англ.* Land Surface Temperature — LST). Эффект снижения температуры поливной пашни (*англ.* Irrigation Cooling Effect — ICE) хорошо известен и обычно используется в климатических или метеорологических исследованиях (Bamston, Schickedanz, 1984; Han, Yang, 2013; Yang et al., 2020). При ирригации испарение воды происходит как с наземной биомассы, так и из капилляров почвенного слоя. Величина ICE более тесно связана с типами орошения и нормами полива, чем спутниковые вегетационные индексы культуры, которые привязаны к фазе развития растений и их архитектоники. Таким образом, ICE может выступать в качестве самостоятельного параметра, характеризующего сельскохозяйственную водообеспеченность поливной пашни.

Целью данной работы был многолетний (2002–2019) мониторинг и анализ значений ICE для ряда речных бассейнов СУАР КНР. Предполагалось провести диагностику водообеспеченности массивов поливной пашни и её изменения в течение последних 18 лет. Особый интерес представляли сельскохозяйственные массивы Джунгарской равнины, находящиеся в зоне влияния воднотранспортной системы Чёрный Иртыш — Джунгарская равнина. Эти массивы обводняются за счёт как местных, так и трансграничных речных ресурсов.

## Территория исследования

В Синьцзян-Уйгурском автономном районе КНР расположена обширная Джунгарская равнина площадью около 700 тыс. км<sup>2</sup>, разделяющая хребты Восточного Тянь-Шаня и отроги Монгольского Алтая (*рис. 1*, см. с. 133). В отрогах Монгольского Алтая находится исток р. Чёрный Иртыш. Река протекает вдоль этих отрогов в направлении с востока на запад, выходит на территорию Казахстана, затем — на территорию России, где впадает в р. Обь, являясь её основным притоком. Воднотранспортная система Чёрный Иртыш — Джунгарская равнина в КНР состоит из двух частей. Одна часть идёт по западной оконечности Джунгарской равнины до г. Карамай (канал Чёрный Иртыш — Карамай). Другая пересекает пещи Дзосотын-Элисун в центре равнины, подходит к административному центру СУАР — г. Урумчи (канал Чёрный Иртыш — Урумчи) и входит в сельскохозяйственную ирригационную систему северных предгорий Восточного Тянь-Шаня (см. *рис. 1*).

В качестве зоны интереса выступали сельскохозяйственные массивы, расположенные на Джунгарской равнине в бассейнах рек Боло-Тала, Куйтунь и Манас (см. *рис. 1*). Эти относительно небольшие реки собирают воду в хребтах Восточного Тянь-Шаня (хребты Боро-Хоро, Эрен-Хабырга и Укен), но их стока недостаточно для освоения всех пригодных для растениеводства земель предгорий. Реки Боло-Тала и Куйтунь впадают в оз. Эби-Нур (площадь зеркала около 700 км<sup>2</sup>), а р. Манас — в одноимённое горько-солённое озеро переменного раз-

мера (до 300 км<sup>2</sup>), расположенное в западной части Джунгарской равнины. Дополнительно в рассмотрение был взят сельскохозяйственный массив р. Хайдык-Гол, стекающей с хребтов внутреннего Тянь-Шаня на юг, в Таримскую впадину (см. *рис. 1*). Река является основным притоком крупного проточного оз. Баграшкель (площадь около 1300 км<sup>2</sup>). Озеро играет важную роль в экономике СУАР, и его размер поддерживается в стабильном состоянии. Поэтому предполагалось, что сельскохозяйственное водопотребление массива пашни р. Хайдык-Гол стабильно в многолетнем аспекте и его можно использовать в качестве эталона.

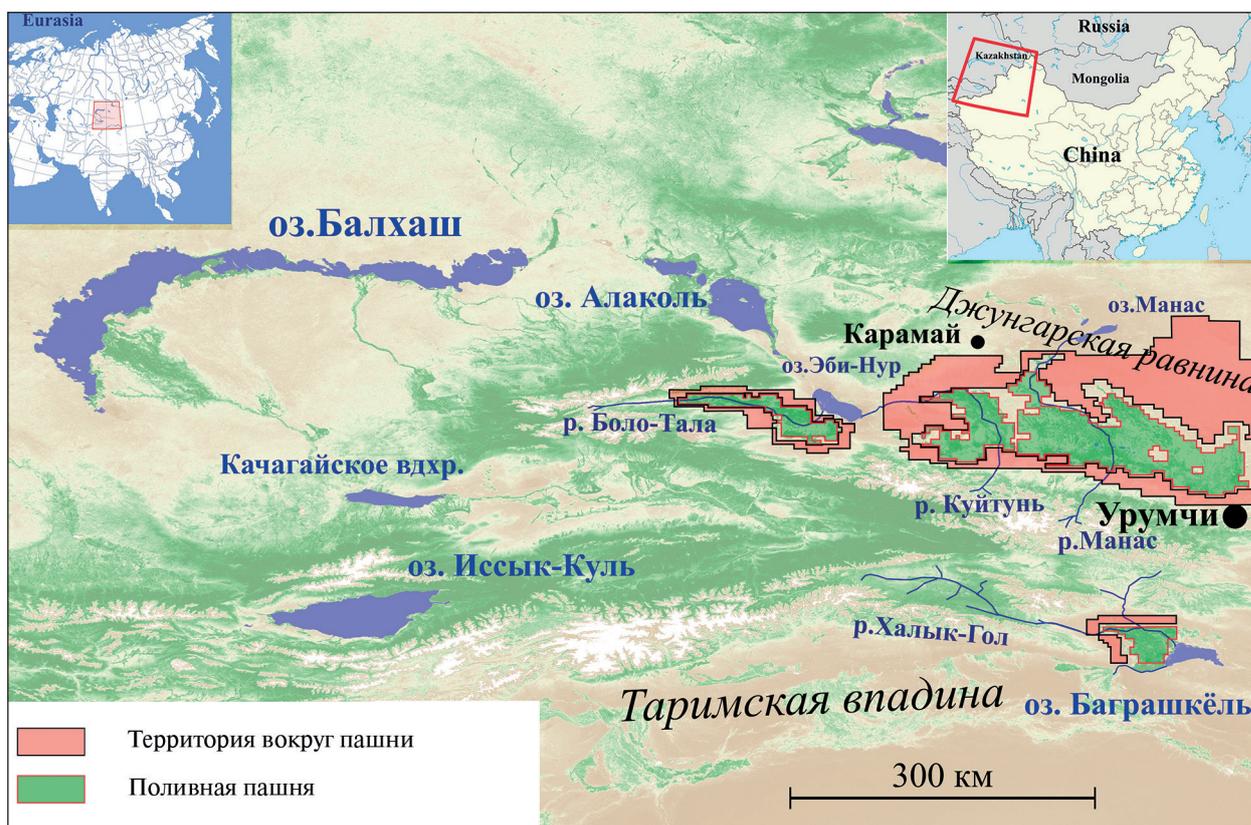


Рис. 1. Территория исследования

Водность сезона в горах Тянь-Шаня в целом зависит от особенностей атмосферного переноса Северного полушария (Терехов и др., 2020б; Terekhov et al., 2020) и количества накопленного за зиму снега. Запасы снега в Центральной Азии в настоящий момент могут достаточно корректно оцениваться по данным специализированных продуктов (Терехов и др., 2019а, 2020в). Но многолетние изменения увлажнённости территорий Тянь-Шаня, трассируемые состоянием природной растительности, в последние годы незначительны (Терехов и др., 2019б) и не имеют выраженной направленности. В связи с этим многолетние изменения водообеспеченности орошаемой пашни, ирригация которой зависит от стока рек Тянь-Шаня, в свою очередь, зависят от перераспределения водных ресурсов с помощью водных каналов и улучшения агротехники возделывания культур.

### Исходная информация

Данные MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) становятся удобным источником информации для характеристики орошаемого земледелия в Центральной Азии (Conrad et al., 2007). Температура подстилающей поверхности характеризовалась с помощью спутниковых данных MODIS LST Collection 6. Существует большое количество вариантов

этого продукта, объединённых под доменным именем MOD11 LST. Оценке температуры поверхности пашни и окружающих территорий мешает облачный покров. Но при решении задачи сезонного мониторинга ICE нет необходимости в высокой частоте обновления данных. В работе использовался продукт LST-С6 системы Famine Early Warning System (FEWS NET), доступный на сайте программы (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/>). Продукт имеет архив с 2002 г., декадное обновление и пространственное разрешение 5 км. Для решения поставленных задач таких характеристик было вполне достаточно.

Вегетационный сезон для однолетних яровых культур выбранных сельскохозяйственных массивов начинается в мае и заканчивается в сентябре. В работе период сезонного мониторинга ICE включал 16 декад: с 3-й декады апреля по 3-ю декаду сентября. Архив доступных спутниковых данных с 2002 г. давал возможность рассматривать динамику ICE в течение 18-летнего периода.

## Методы анализа

Оценка потерь воды через испарение с подстилающей поверхности почвы количественно вычисляется обычно через модельный расчёт эвапотранспирации (растительность + почва). Популярны балансовые расчёты SWAP (*англ.* soil – water – atmosphere – plant, «почва – вода – атмосфера – растение») (Kroes et al., 2017), SEBAL (*англ.* Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen et al., 2005) либо региональные модели (Зейлигер и др., 2019; Музылев и др., 2017, 2019). В настоящей работе ставилась задача диагностики изменений водообеспеченности пахотных земель СУАР КНР в течение последних 18 лет. Для получения относительных качественных оценок расчёт можно упростить и оперировать только величинами ICE, не внося ошибки и неопределённости, присущие сложным балансовым моделям. Ещё одним параметром, характеризующим сельскохозяйственное водопотребление, было произведение ICE на температуру окружающих территорий ( $ICE \times T$ ). Это позволяло в определённой мере учесть погодный фактор, поскольку объём эвапотранспирации зависит не только от величины ICE, но и от абсолютной температуры поверхности земли.

Для каждого из четырёх выбранных сельскохозяйственных массивов, привязанных к бассейнам соответствующих рек СУАР, были определены по две зоны: сельскохозяйственная зона орошаемого земледелия и окружающая её природная зона (см. *рис. 1*). Регистрировалась средняя LST-температура этих зон в каждом из анализируемых бассейнов рек и рассчитывалась величина ICE. Для этого из большего значения температуры окружающей территории вычиталась меньшая температура орошаемой пашни. То есть величина ICE имела положительное значение — чем больше, тем значительней эффект охлаждения подстилающей поверхности за счёт эвапотранспирации.

Полученная 18-летняя база температурных данных анализировалась для выделения различных моментов, характеризующих режимы увлажнения пашни в бассейнах выбранных рек. Рассматривалась динамика значений ICE как в аспекте внутрисезонных вариаций значений (апрель – сентябрь), так и многолетних изменений 2002–2019 гг. Для понимания направленности изменений последних лет временной период 2002–2019 гг. был разбит на два отрезка: 2002–2011 и 2012–2019 гг., характеристики которых сравнивались между собой.

## Полученные результаты

На *рис. 2* (см. с. 135) показаны средние многолетние температурные режимы пашни и окружающих её земель для всех тестируемых массивов. На *рис. 3* (см. с. 135) отображена межсезонная (2002–2019) динамика значений ICE для первых декад июня и июля. Усреднённые сезонные максимумы ICE периода 2002–2019 гг. для бассейнов рек составили: для р. Халык-Гол — 12,2 К, р. Боло-Тала — 8,1 К, р. Манас — 12,5 К, р. Куйтунь — 13,2 К. Сравнительные данные по изменениям температурных режимов между выбранными периодами (2012–2019 гг. против 2002–2011 гг.) представлены на *рис. 4, 5* (см. с. 136).

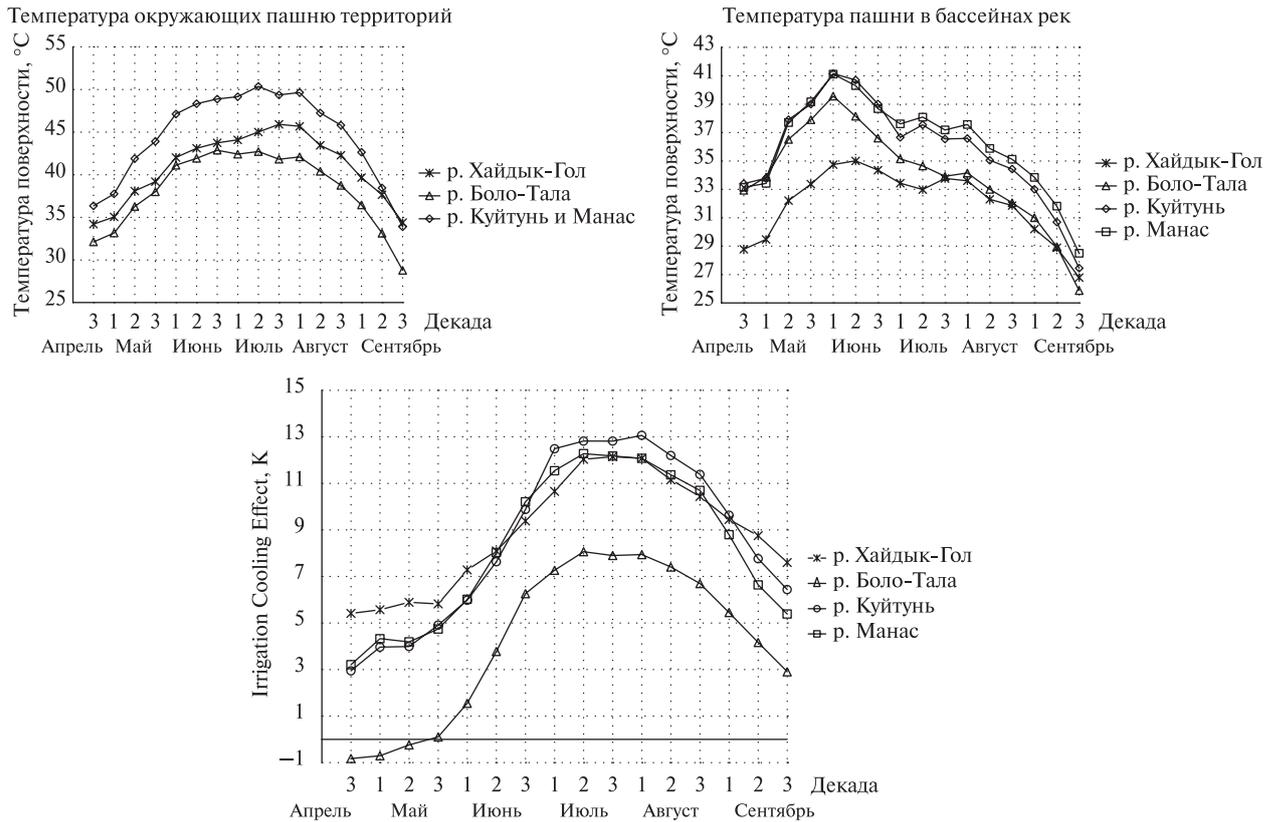


Рис. 2. Средние многолетние (2002–2019) температурные режимы поливной пашни и окружающих её территорий в бассейнах анализируемых рек СУАР КНР. Построено по декадным данным LST-C6 FEWS NET

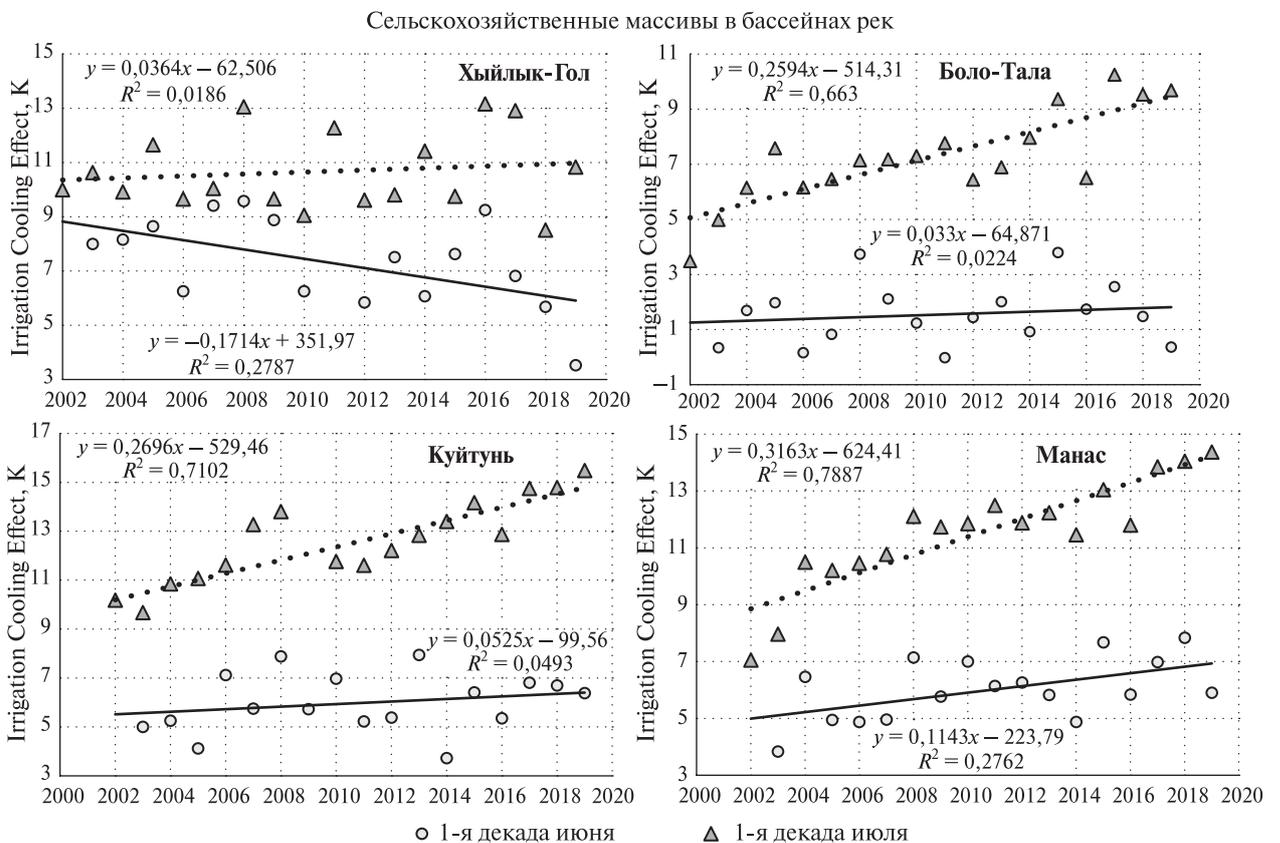


Рис. 3. Многолетняя (2002–2019) динамика значений ICE в четырёх рассматриваемых бассейнах рек СУАР КНР для двух декад вегетационного сезона. Построено по декадным данным LST-C6 FEWS NET

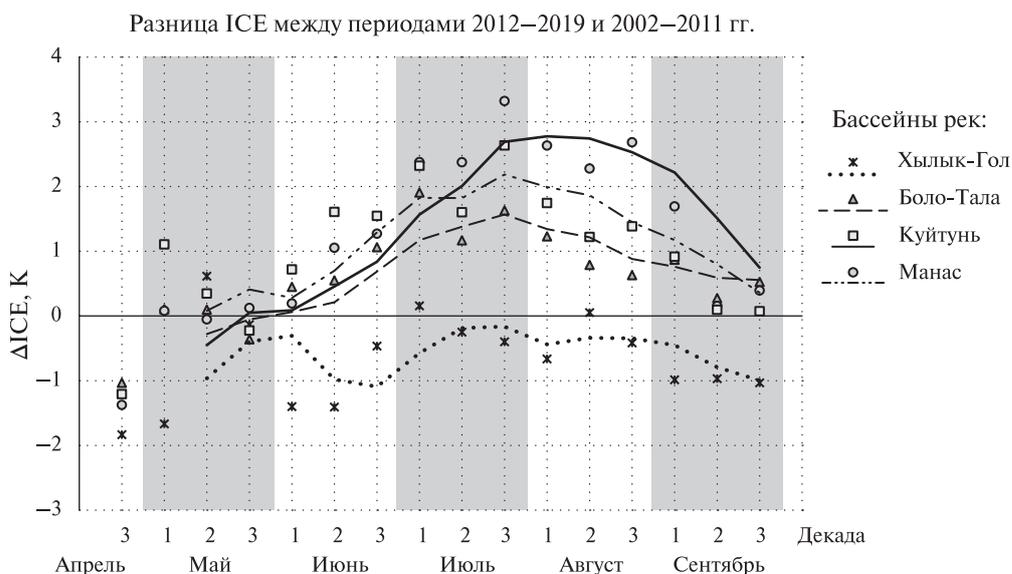


Рис. 4. Разница величин ISE между периодами 2012–2019 и 2002–2011 гг. для четырёх рассматриваемых бассейнов рек СУАР КНР. Кривые — усреднение в плавающем месячном временном окне. Построено по декадным данным LST-C6 FEWS NET

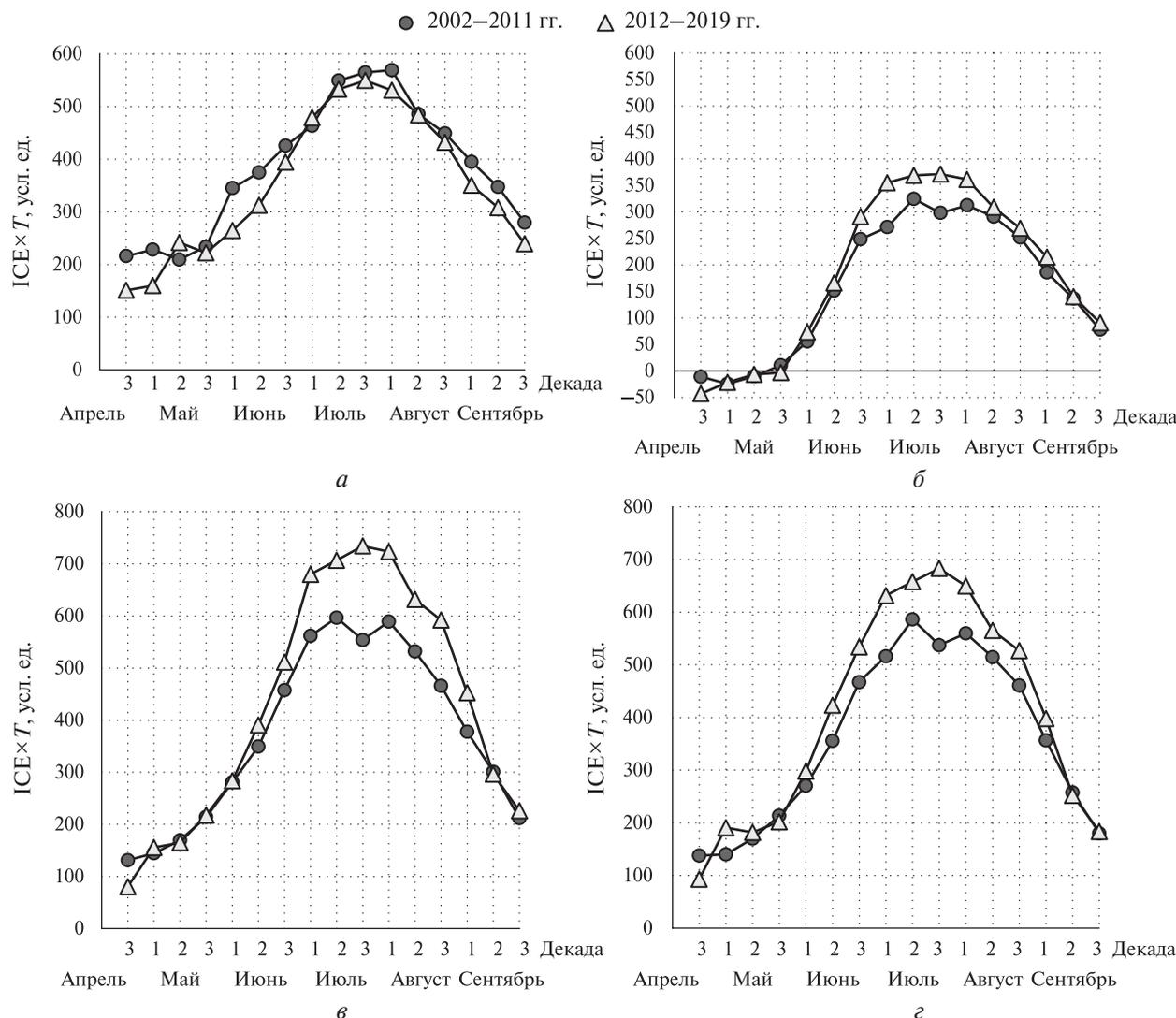


Рис. 5. Температурные режимы поливной пашни в периоды 2002–2011 и 2012–2019 гг. по параметру  $(ICE \times T)$  в бассейнах рек: а — Хылык-Гол; б — Боло-Тала; в — Куйтунь; г — Манас. Построено по декадным данным LST-C6 FEWS NET

## Обсуждение

В аридном климате с большими градиентами температуры «день – ночь», «весна – лето» LST-температура становится информативным параметром, который может использоваться для ранжирования земель (Зареи, Щербаков, 2017). Сезонные температурные режимы подстилающей поверхности территорий, окружающих поливную пашню СУАР КНР, представляют собой выпуклые графики с максимумом в июле (см. *рис. 2*). Наименьшие температуры сезонного максимума среди рассмотренных бассейнов регистрируются в р. Боло-Тала, что, скорее всего, вызвано влиянием горно-долинной циркуляции с близко расположенных склонов гор, охлаждаемых за счёт их возвышения над уровнем моря. Температурный режим поливной пашни во всех рассмотренных бассейнах рек характеризуется выраженным максимумом на первую декаду июня. Позже сельскохозяйственная растительность начинает покрывать поверхность почвы, что обеспечивает охлаждение подстилающей поверхности. Листовые пластины нагреваются на солнце заметно меньше, чем поверхность почвы. Эвапотранспирация надземной биомассы культурной растительности за счёт влаги, поглощаемой корневой системой из глубоких слоёв почвы, обеспечивает более значимое понижение температуры подстилающей поверхности (см. *рис. 2*).

К сожалению, мы не располагаем данными подспутниковых измерений на территории СУАР КНР. Поэтому нет возможности совмещать обработку спутниковых и наземных данных, как это делается в некоторых работах (Блохин и др., 2019). В нашем случае единственным источником информации выступают спутниковые данные. Можно выделить две декады, наиболее интересные для диагностики многолетней динамики эвапотранспирации с поверхности сельскохозяйственных угодий. Во-первых, это первая декада июня — время сезонного максимума абсолютной температуры пашни. Во-вторых, первая декада июля — время активной вегетации и выхода на сезонное плато наиболее высоких значений ICE (см. *рис. 2*). Многолетние тренды значений ICE в эти декады характеризуют важные параметры сельскохозяйственного водопотребления. В частности, величины ICE первой декады июня зависят от уровня увлажнения поверхности почвы, которое определяется способом полива и поливной нормой. Величины ICE на первую декаду июля связаны с количеством почвенной влаги, доступной для растительности, т. е. с водообеспеченностью корнеобитаемого слоя почвы.

Анализ 18-летнего периода показал, что в начале июня значения ICE были стабильны, т. е. в режиме ирригации поливной пашни в бассейнах рек Боло-Тала и Куйтунь значимые изменения отсутствовали (см. *рис. 3*). Коэффициенты детерминации близки к нулю (0,02 и 0,05 соответственно). В сельскохозяйственном массиве р. Халык-Гол регистрировалось некоторое уменьшение значений ICE, в бассейне р. Манас, наоборот, — его увеличение. Но тренды выражены слабо, коэффициенты детерминации — 0,28 в обоих случаях. Для бассейна р. Халык-Гол это может трактоваться как результат экономии водных ресурсов, а для бассейна р. Манас — как рост объёмов водопотребления за счёт дополнительных источников воды. Для близких по климатическим условиям бассейнов рек Халык-Гол, Куйтунь и Манас величины ICE на начало июня стремились к уровню 6–7 К, что, по всей видимости, становится отражением оптимального уровня ирригации почвенного слоя, принятого в данной местности в этот период.

Многолетняя динамика значений ICE на первую декаду июля показала отсутствие изменений в бассейне р. Халык-Гол (коэффициент детерминации 0,02). Но регистрировались выраженные тренды роста значений ICE в бассейнах рек Боло-Тала, Куйтунь и Манас с коэффициентами детерминации соответственно 0,66; 0,71 и 0,79 (см. *рис. 3*). Скорость роста величин ICE на первую декаду июля составила в бассейнах рек: Боло-Тала — 2,6 К/10 лет; Куйтунь — 2,7 К/10 лет; Манас — 3,2 К/10 лет. Сравнение различий средних величин ICE в течение вегетационного сезона между эпохами 2012–2019 и 2002–2011 гг. показало незначительное (в пределах 1 К) уменьшение для бассейна р. Халык-Гол и рост в остальных рассматриваемых бассейнах (см. *рис. 4*): около 1 К — в бассейне р. Боло-Тала, около 2 К — в бассейне р. Манас и 2,5 К — в бассейне р. Куйтунь. Наиболее значимые различия регистрировались в июле – августе (см. *рис. 4*), что, очевидно, связано с более развитой надземной

биомассой сельскохозяйственных культур в 2012–2019 гг. в сравнении с 2002–2011 гг. (см. рис. 4).

Величины ICE также зависят от погодных условий. Жаркая или относительно прохладная сезонная погода влияет на значения ICE. На рис. 5 рассмотрены усреднённые для эпох кривые значений произведения ( $ICE \times T$ ). Сезонные зависимости этого параметра в некоторой степени учитывают влияние температурного фона сезона, определяемого погодными условиями, и более корректно отражают сельскохозяйственное водопотребление в сравниваемых временных диапазонах 2002–2011 и 2012–2019 гг. Полученные результаты подтверждают наличие роста сельскохозяйственного водопотребления последние годы в бассейнах рек Боло-Тала, Куйтунь и Манас начиная с 3-й декады июня до 2-й декады сентября (см. рис. 5). Этот рост обусловлен увеличением эвапотранспирации с наземной биомассы культуры, что также согласуется с регистрируемым ростом вегетационных индексов на сельскохозяйственных территориях в этом районе (Терехов и др., 2020а).

## Заключение

Продукт LST FEWS NET с декадным обновлением и архивом с 2002 г. по текущий момент представляется эффективным инструментом оценки ICE в аридном климате СУАР КНР. Типичные значения величины ICE в 10–15 К уверенно регистрируются существующими природоресурсными спутниковыми системами и выступают удобным параметром диагностики водообеспеченности поливной пашни и её изменений за период мониторинга.

Показано, что в водоизбыточном бассейне р. Хылык-Гол, взятом в качестве эталона, многолетняя динамика величин ICE практически отсутствовала. Вододефицитные сельскохозяйственные массивы на Джунгарской равнине в бассейнах рек Боло-Тала, Куйтунь и Манас характеризовались значимым ростом значений ICE, особенно в период июль–август. Бассейны рек Манас и Куйтунь находятся в зоне влияния воднотранспортной инфраструктуры р. Чёрный Иртыш–Джунгарская равнина (Чёрный Иртыш–Каратау и Чёрный Иртыш–Урумчи), что даёт возможность улучшения ирригации за счёт трансграничной р. Чёрный Иртыш.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проекты № AP 08957394 и AP 05134241.

## Литература

1. Блохин Ю. И., Белов А. В., Блохина С. Ю. Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеоусловий для интерпретации данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 87–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95.
2. Зареи С., Шербаков В. М. Природно-ресурсное районирование провинции Хузестан Иран с применением термического дистанционного зондирования Земли и геоинформационного картографирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 110–121. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-110-121.
3. Зейлигер А. М., Ермолаева О. С., Музылев Е. Л., Старцева З. П., Сухарев Ю. И. Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 33–43. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43.
4. Музылев Е. Л., Старцева З. П., Успенский А. Б., Волкова Е. В., Василенко Е. В., Кухарский А. В., Зейлигер А. М., Ермолаева О. С. Использование данных дистанционного зондирования для моделирования водного и теплового режимов сельских территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 108–136. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136.
5. Музылев Е. Л., Старцева З. П., Зейлигер А. М., Ермолаева О. С., Волкова Е. В., Василенко Е. В., Осипов А. И. Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности

- и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 44–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-44-60.
6. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Юничева Н. П. (2019а) Аномальный режим снежности 2019 г. и многолетние тренды в изменениях высоты снежного покрова Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 351–355. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-351-355.
  7. Терехов А. Г., Витковская И. С., Абаев Н. Н., Долгих С. А. (2019б) Многолетние тренды в состоянии растительности хребтов Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау по данным eMODIS NDVI C6 (2002–2019) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 133–142. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-133-142.
  8. 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.
  9. 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. 143–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-143-149.
  10. Терехов А. Г., Ивкина Н. И., Абаев Н. Н., Елтай А. Г., Егембердиева З. М. (2020в) Валидация суточного продукта Snow Depth FEWS NET для бассейна реки Урал по данным метеорологических наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 31–40. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-31-40.
  11. Якушев В. П., Дубенок Н. Н., Лупян Е. А. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
  12. Bamston A. G., Schickedanz P. N. The effect of irrigation on Warm Season Precipitation in Southern Great Plains // J. Climate and Applied Meteorology. 1984. V. 23. P. 865–888. DOI: 10.1175/1520-0450(1984)023<0865:TEOIOW>2.0.CO;2.
  13. Bastiaanssen W. G. M., Noordman E. J. M., Pelgrum H., Davids G., Thoreson B. P., Allen R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions // J. Irrigation and Drainage Engineering. 2005. V. 131. No. 1. P. 85–93. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85).
  14. Conrad C., 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 // J. Irrigation and Drainage Systems. 2007. V. 21. P. 197–218. DOI: 10.1007/s10795-007-9029-z.
  15. Han S., Yang Zh. Cooling effect of agricultural irrigation over Xinjiang, Northwest China from 1959 to 2006 // Environmental Research Letters. 2013. V. 8. No. 2. 024039. DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/024039.
  16. Kroes J. G., Van Dam J. C., Bartholomeus R. P. SWAP version 4: Theory description and user manual. Wageningen Environmental Research. Report 2780. 2017. 285 p.
  17. 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. No. 03004. DOI: 10.1051/e3sconf/202014903004.
  18. Yang Q., Huang X., Tang Q. Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations // Science of the Total Environment. 2020. V. 705. 135984. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135984.

## Satellite estimation of agriculture water availability using the 2002–2019 irrigation cooling effect over Xinjiang, Northwest China

A. G. Terekhov

*Institute of Information and Computing Technology MES RK*

*Almaty 050010, Kazakhstan*

*E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

*RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan*

*E-mail: terekhov\_a@meteo.kz*

Irrigation of arable land in arid climate significantly reduces land surface temperature (LST). This phenomenon is called Irrigation Cooling Effect (ICE). The long-term dynamics (2002–2019) of the ICE were used to diagnose the agriculture water availability in the basins of four rivers of Xinjiang, Northwest China: Halyk-Gol (Tarim Depression), Bolo-Tala, Kuytun, and Manas (Dzungarian Plain). In this research, the satellite product LST-C6 FEWS NET based on MOD11 LST and covering the period of April–September was used. The LST-C6 FEWS NET data have resolution 5 km and ten-day renewal. The seasonal ICE maxima for the period 2002–2019 were: 12.2 K in Halyk-Gol basin; 8.1 K in Bolo-Tala basin; 12.5 K in Manas basin, and 13.2 K in Kuytun basin. The long-term ICE monitoring during April–September showed that the arable land in the Khylyk-Gol basin (Tarim Depression) has a stable regime with a slight tendency to decrease in May–June. On the Dzungarian Plain, the ICE growth in July and August was recorded. The ICE growth for the 1<sup>st</sup> decade of July was: in the Bolo-Tala basin 2.6 K/10 years (the coefficient of determination 0.66); in the Kuytun basin 2.7 K/10 years (0.71); in the Manas basin 3.2 K/10 years (0.79), respectively. Thus, an improvement of agriculture water availability in the Dzungarian Plain, Xinjiang, was registered. The Manas and Kuytun basins are located in the zone of influence of the Black Irtysh–Dzungarian Plain water transport infrastructure, which allows improving irrigation due to the cross-border (Kazakhstan–China) resources of the Black Irtysh River.

**Keywords:** irrigated arable land, land surface temperature, irrigation cooling effect, long-term monitoring, MOD11, LST-C6 FEWS NET, agriculture water availability, long-term trends

Accepted: 22.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-131-141

### References

1. Blokhin Yu. I., Belov A. V., Blokhin S. Yu., Kompleksnaya sistema kontrolya vlazhnosti pochvy i lokal'nykh meteoslovii dlya interpretatsii dannykh distantsionnogo zondirovaniya (Integrated system for control of soil moisture and local weather conditions for remote sensing data interpretation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 87–95, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-87-95.
2. Zareie S., Sherbakov V. M., Prirodno-resursnoe raionirovanie provintsii Khuzestan Iran s primeneniem termicheskogo distantsionnogo zondirovaniya Zemli i geoinformatsionnogo kartografirovaniya (Natural resource zoning of Khuzestan Province of Iran using thermal remote sensing and geoinformation mapping), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 110–121, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-110-121.
3. Zeylinger A. M., Ermolaeva O. S., Muzylev E. L., Startseva Z. P., Sukharev Yu. I., Komp'yuternyi analiz rezhimov vodnogo stressa oroshaemykh agrotsenozov s ispol'zovaniem SWAP-modeli, a takzhe dannykh nazemnogo i kosmicheskogo monitoringa (Computer analysis of water stress regimes of an irrigated agrocoenosis using the SWAP model and ground and space monitoring data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 33–43, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-33-43.
4. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Uspensky A. B., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Kukharsky A. V., Zeylinger A. M., Ermolaeva O. S., Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya modelirovaniya vodnogo i teplovogo rezhimov sel'skikh territorii (Using remote sensing data to model water and heat re-

- gimes of rural territories), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 108–136, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-108-136.
5. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Osipov A. I., Ispol'zovanie sputnikovyykh dannykh o kharakteristikakh podstilayushchei poverkhnosti i meteorologicheskikh kharakteristikakh pri modelirovanii vodnogo i teplovogo rezhimov bol'shogo sel'skokhozyaistvennogo regiona (The use of satellite data on land surface and meteorological characteristics in modeling the water and heat regimes of large agricultural region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 44–60, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-44-60.
  6. Terekhov A. G., Abayev N. N., Yunicheva N. R. (2019a), Anomal'nyi rezhim snezhnosti 2019 g. i mnogoletnie trendy v izmeneniyakh vysoty snezhnogo pokrova Kazakhstana (Anomalous snow regime in 2019 and long-term trends in snow depth in Kazakhstan), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 351–355, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-351-355.
  7. Terekhov A. G., Vitkovskaya I. S., Abayev N. N., Dolgikh S. A. (2019b), Mnogoletnie trendy v sostoyanii rastitel'nosti khrebtov Tyan'-Shanya i Dzhungarskogo Alatau po dannym eMODIS NDVI C6 (2002–2019) (Long term trends in vegetation in Tien-Shan and Dzungarian Alatau from eMODIS NDVI C6 data (2002–2019)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 133–142, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-133-142.
  8. Terekhov A. G., Abayev N. N., Lagutin E. I. (2020a), Diagnostika vodoobespechennosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur SUAR KNR v techenie 2003–2019 gg. po dannym eMODIS NDVI C6 (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, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-128-138.
  9. Terekhov A. G., Abayev N. N., Vitkovskaya I. S., Pak A. A., Yegemberdyeva Z. M. (2020b), O svyazi mezhdu sostoyaniem gornoj rastitel'nosti Tyan'-Shanya i indeksami Severo-Atlanticheskoi Ostsillyatsii v vesenneletnii period sleduyushchego goda (Links between the vegetation state over Tien-Shan mountains and North Atlantic Oscillation indices of the upcoming season), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 143–149, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-143-149.
  10. Terekhov A. G., Ivkina N. I., Abayev N. N., Yeltay A. G., Yegemberdyeva Z. M. (2020v), Validatsiya su-tochnogo produkta Snow Depth FEWS NET dlya basseina reki Ural po dannym meteorologicheskikh nablyudenii (Validation of daily “Snow Depth” FEWS NET product over River Ural basin on snow depth meteorological observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 31–40, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-31-40.
  11. Yakushev V. P., Dubenok N. N., Loupian E. A., Opyt primeneniya i perspektivy razvitiya tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya sel'skogo khozyaistva (Earth remote sensing technologies for agriculture: application experience and development prospects), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 11–23, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
  12. Bamston A. G., Schickedanz P. N., The effect of irrigation on Warm Season Precipitation in Southern Great Plains, *J. Climate and Applied Meteorology*, 1984, Vol. 23, pp. 865–888, DOI: 10.1175/1520-0450(1984)023<0865:TEOIOW>2.0.CO;2.
  13. Bastiaanssen W. G. M., Noordman E. J. M., Pelgrum H., Davids G., Thoreson B. P., Allen R. G., SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions, *J. Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, Vol. 131, No. 1, pp. 85–93, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85).
  14. 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, *J. Irrigation and Drainage Systems*, 2007, Vol. 21, pp. 197–218, DOI: 10.1007/s10795-007-9029-z.
  15. Han S., Yang Zh., Cooling effect of agricultural irrigation over Xinjiang, Northwest China from 1959 to 2006, *Environmental Research Letters*, 2013, Vol. 8, No. 2, 024039, DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/024039.
  16. Kroes J. G., Van Dam J. C., Bartholomeus R. P., *SWAP version 4: Theory description and user manual*, Wageningen Environmental Research, Report 2780, 2017, 285 p.
  17. 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, No. 03004, DOI: 10.1051/e3sconf/202014903004.
  18. Yang Q, Huang X., Tang Q., Irrigation cooling effect on land surface temperature across China based on satellite observations, *Sci. Total Environ.*, 2020, Vol. 705, 135984, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135984.