

Спутниковые оценки влияния вторичного засоления пашни на устойчивость растениеводства в ирригационном массиве «Голодная степь» (Казахстан)

А. Г. Терехов¹, Г. Н. Сагатдинова¹, И. Ю. Савин^{2,3}, Е. Н. Амиргалиев¹

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

² *Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Москва, 119017, Россия
E-mail: savin_iyu@esoil.ru*

³ *Институт экологии РУДН, Москва, 115093, Россия
E-mail: savin_iyu@esoil.ru*

Вторичное засоление и недостаток водных ресурсов для крупного (140 тыс. га) ирригационного массива «Голодная степь» (Казахстан), расположенного в бассейне р. Сырдарьи, негативно влияет на состояние сельскохозяйственных культур. Оценка направленности тенденций последних лет в изменениях сельскохозяйственной растительности представляет значительный интерес. Для очистки полей от вторичного засоления в регионе практикуется зимняя промывка. При её проведении на полях в период января–февраля формируются водные зеркала, которые могут регистрироваться спутниками. Таким образом, существует возможность ранжировать поливную пашню и выделять поля, отправленные из-за вторичного засоления на промывку в конце сезона. Выделение засоленных, по мнению фермеров, полей открывает возможности проводить сравнительный анализ отличий вегетации этих полей от остальных и таким образом диагностировать состояние регионального растениеводства. Спутниковые данные Sentinel-2 с разрешением 10 м периода 2017–2022 гг. использовались для анализа сезонных максимумов вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) для двух групп полей, посевов всего региона и засоленных полей, отобранных фермерами в конце года для их промывки зимой. Спутниковая съёмка Sentinel-1, -2 и Landsat-8, -9 в период января–февраля 2017–2023 гг. была основой для создания масок зимних водных зеркал. Была оценена направленность и значимость тренда изменений разницы между сезонными максимумами NDVI у наиболее засоленных полей и всеми полями и зарегистрирован тренд уменьшения этой разности с достоверностью линейной аппроксимации $R^2 = 0,93$ и значением фактора Фишера–Снедекора $F = 56,2$ ($F = 8,47$; $\alpha = 0,01$). Около 30 % полей региона ежегодно промывается от вторичного засоления. Динамика различий в состоянии сельскохозяйственной растительности засоленных полей в период 2017–2022 гг. характеризовалась выраженной детерминированностью и направленностью на уменьшение отличий от остальных полей региона. Таким образом, в течение последних шести лет (2017–2022) растениеводство ирригационного массива «Голодная степь» (Казахстан) демонстрировало стабильность агротехнического уровня и устойчивость к сезонным погодным вариациям температурного режима и водности р. Сырдарьи.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, поливное земледелие, вторичное засоление, зимняя промывка, бассейн реки Сырдарьи, устойчивость растениеводства

Одобрена к печати: 25.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-143-152

Введение

Изменение климата и растущее потребление воды создают потенциальные угрозы водной и продовольственной безопасности в бассейне Аральского моря (Lioubimtseva, 2015; Wang et al., 2020). Сельскохозяйственное производство в регионе базируется на поливном земледелии. Экономическое состояние стран бассейна Аральского моря (Казахстана, Узбекистана, Туркмении, Киргизии, Таджикистана) не позволяет повсеместно создать дорогостоящую, но высокоэффективную ирригационно-дренажную систему (Conrad et al., 2020; Lobanova et al.,

2021). Например, в Казахстане потери воды при её транспортировке до полей по причине отсутствия облицовки у большей части ирригационной инфраструктуры всё ещё могут достигать 50 % и более (Cai et al., 2003).

Резко континентальный климат Центральной Азии характеризуется значительными сезонными вариациями температурного режима, количества осадков (Khan, Holko, 2009) и, соответственно, водности рек региона (Bissenbayeva et al., 2021; Hu et al., 2021). Речной сток является основным источником воды для ирригации полей, и его высокая межсезонная вариативность усложняет организацию эффективной системы управления водными ресурсами. В многоводные годы влагосберегающие технологии, например основанные на капельном поливе (Sun et al., 2019), производят неконкурентную, из-за высокой стоимости, продукцию. А в маловодные годы традиционные водозатратные схемы полива (бороздковый полив) не имеют достаточного количества воды для обеспечения высокой урожайности культур.

Поливное земледелие в Приаралье в той или иной мере подвержено негативному влиянию вторичного засоления (Duan et al., 2022; Leng et al., 2021; Platonov et al., 2013). Сезонная вариативность температурного режима и речных ресурсов на фоне процессов вторичного засоления образуют сложную, многофакторную систему функционирования растениеводства на поливной пашне Приаралья. Оптимизация государственной политики в области поливного земледелия Казахстана требует наличия обратной связи в виде объективной информации, характеризующей устойчивость растениеводства в условиях рыночной экономики и сезонной вариативности погодных условий и водности рек. Однако весьма сложно получить объективные оценки об изменениях в состоянии поливного земледелия Приаралья на характерных временных масштабах действия отдельных государственных программ и управленческих решений (около 5 лет). Фактор погодных условий и различная водность сезонов влияют на абсолютные характеристики растениеводства, что маскирует направленность трендов изменений устойчивости сельскохозяйственного производства.

Вегетационный индекс, регистрируемый на основе данных, получаемых с орбитальных платформ, и отражающий объём зелёной биомассы, может выступать в качестве универсальной, объективной характеристики состояния посевов сельскохозяйственных культур (Хуе, Су, 2017). Типичный размер полей на поливной пашне существенно меньше, чем на богаре. Поэтому для мониторинга ирригационных массивов необходимы спутниковые данные высокого пространственного разрешения. Существуют архивы спутниковых данных свободного доступа, что делает возможным многолетние оценки с различным пространственным разрешением. Например, данные Sentinel-2 с разрешением 10 м. Состояние посевов на поливной пашне Приаралья полностью определяется ирригацией, а следовательно, тесно связано с водностью рек региона. Сезонная снежность зон формирования стока в хребтах Тянь-Шаня и водность рек Центральной Азии сильно варьируется и может характеризоваться режимом чередования сухих и влажных периодов (Терехов и др., 2021).

В настоящей работе решалась задача анализа относительно краткосрочных современных тенденций в состоянии вегетации на поливной пашне Казахстана, и в частности в ирригационном массиве «Голодная степь». В качестве базовой информации использовались спутниковые данные Sentinel-2 периода 2017–2022 гг. с пространственным разрешением 10 м.

Территория обследования

Крупный поливной массив «Голодная степь» расположен в бассейне р. Сырдарьи на границе между Казахстаном и Узбекистаном. Казахстану принадлежит его меньшая часть с площадью около 140 тыс. га поливной пашни. Административно эта пашня относится к Мактааральскому и Жетысайскому районам Туркестанской обл. Казахстана (рис. 1, см. с. 145).

Возделываемые в исследуемом регионе культуры можно разбить на два класса: поливные культуры (доминирующий класс) и рисовая аквакультура (Abdullaev, Molden, 2004). Технологии водопользования и объёмы потребляемой воды у этих двух классов сельскохозяйственных культур существенно различаются. Оросительная норма для посевов риса примерно в три раза выше средней для региона (Abikenova et al., 2015). Затопление посевов риса в те-

чение значительной части вегетационного сезона приводит к ситуации, когда эти поля довольно долго находятся в состоянии фактической промывки. Состояние десятков других поливных культур контролируется доступностью водных ресурсов для ирригации и уровнем вторичного засоления пашни (Zhang et al., 2019).

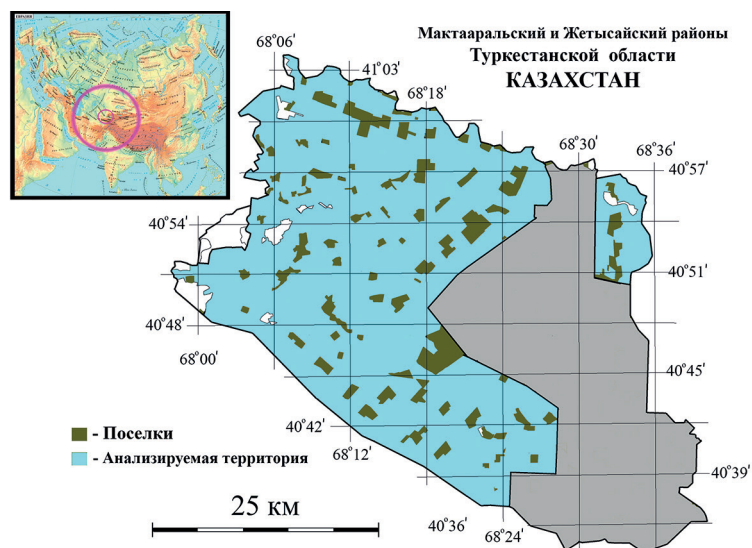


Рис. 1. Казахстанская часть массива орошения «Голодная степь» с выделением территорий анализируемых сельских округов

Различия параметров, определяющих эффективность растениеводства, между аквакультурой риса и поливными культурами достаточно велики, поэтому в данном исследовании анализ влияния вторичного засоления включал территории только 13 сельских округов, в которых рисовые посевы практически отсутствуют. В результате из территории обследования были исключены 7 сельских округов, практикующих посевы риса (Терехов и др., 2022) (см. рис. 1). Таким образом, суммарная площадь анализируемой поливной пашни составила чуть больше 90 тыс. га.

Исходные данные и методы исследования

Доступ к спутниковым данным и их обработка осуществлялись в облачной платформе Google Earth Engine. Вторичное засоление поливной пашни представляет собой постоянно действующий негативный фактор, влияющий на растениеводство. Для очистки пахотного и подпахотного слоя почвы от вторичного засоления в регионе практикуется зимняя промывка (Терехов и др., 2022). При сильном засолении полей в период с декабря по март согласно существующим агротехническим нормам рекомендуется подавать в 2–3 такта от 8 до 12 тыс. м³ воды на гектар. При средней степени засоления норму подачи воды снижают до 4–8 тыс. м³ воды на гектар (Рамазанов, Якубов, 1988).

При проведении зимней промывки на полях в период января – февраля формируются водные зеркала, которые уверенно регистрируются спутниками. Дешифровка водных зеркал может осуществляться по данным Sentinel-1, -2 и Landsat-8, -9. В настоящем исследовании использовались маски воды, приведённые в работе (Абаев и др., 2023), которые были дополнены маской 2023 г. Водные зеркала на поливной пашне в зимний период (январь – февраль) позволяют выделять поля, выбранные фермерами после окончания сезона для промывки от вторичного засоления.

В настоящем исследовании для каждого сезона периода 2017–2022 гг. формировалось по две маски. Первая – это маска всех полей тестового региона. Вторая – маска засоленных

полей, отправленных на промывку в конце сезона, т. е. водные зеркала января – февраля следующего года. Предполагалось, что разница в среднем состоянии растительности между этими масками трассирует величину негативного влияния вторичного засоления рассматриваемого сезона, а временной ряд характеризует устойчивость растениеводства в целом.

Сезонный максимум вегетационного индекса представляется одним из информативных параметров, поскольку он наиболее тесно связан с урожайностью культур (Денисов и др., 2021). Поэтому в качестве параметра, характеризующего состояние вегетации на полях, в настоящем исследовании был выбран сезонный максимум наиболее широко используемого индекса растительности NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный вегетационный индекс). Индекс рассчитывается по формуле $NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red)$ и имеет вариативность от -1 до +1. В работе использовались данные спутника Sentinel-2 с разрешением 10 м периода 2017–2022 гг. Расчёт осуществлялся с помощью каналов 4 и 8 (канал 4: 650–680 нм (Red, красный), канал 8: 855–899 нм (NIR – *англ.* Near Infrared, ближний инфракрасный)) по формуле: $NDVI = (B8 - B4)/(B8 + B4)$. Таким образом, определялись средние величины сезонных максимумов вегетационного индекса NDVI для выбранных групп полей в шести сезонах 2017–2022 гг. Информация по объёмам использованной спутниковой съёмки представлена в *табл. 1, 2*.

Таблица 1. Площади зарегистрированных водных зеркал на пашне ирригационного массива «Голодная степь» в Казахстане в январе – феврале (зимняя промывка) и объём использованной для этого спутниковой съёмки Landsat-8, -9, Sentinel-1, -2

Год	Число использованных спутниковых сцен	Площадь водного зеркала, км ²
2017	14	458
2018	41	561
2019	31	484
2020	34	404
2021	39	421
2022	38	417
2023	42	304

Таблица 2. Характеристики сезонного максимума вегетации в пределах проанализированных масок пашни ирригационного массива «Голодная степь» в Казахстане в период 2017–2022 гг. и объём использованной при этом спутниковой съёмки Sentinel-2

Год	Число использованных спутниковых сцен	Тип проанализированной маски поливной пашни	Среднее значение NDVI	Стандартное отклонение NDVI
2017	23	Вся пашня	0,555	0,129
		Промытая в следующем году	0,540	0,127
2018	48	Вся пашня	0,520	0,129
		Промытая в следующем году	0,507	0,129
2019	53	Вся пашня	0,542	0,132
		Промытая в следующем году	0,539	0,133
2020	41	Вся пашня	0,567	0,145
		Промытая в следующем году	0,581	0,153
2021	42	Вся пашня	0,507	0,131
		Промытая в следующем году	0,523	0,130
2022	43	Вся пашня	0,547	0,134
		Промытая в следующем году	0,568	0,130

Полученные результаты и их обсуждение

В исследовании использовались маски зимних (январь–февраль) водных зеркал на пашне ирригационного массива «Голодная степь» (Казахстан) в период 2017–2023 гг. (рис. 2). Также были построены сезонные максимумы NDVI 2017–2022 гг. для поливной пашни анализируемой территории (рис. 3). Маски водных зеркал позволили сформировать для каждого сезона по две выборки полей: 1 — все посеы; 2 — поля, промытые в следующем сезоне. Разница средних величин сезонных максимумов NDVI между всеми полями и полями, промытыми в следующем году, представленных в виде временных рядов из шести отсчётов, характеризовала современные тенденции (2017–2022) устойчивости регионального растениеводства (рис. 4, см. табл. 2).

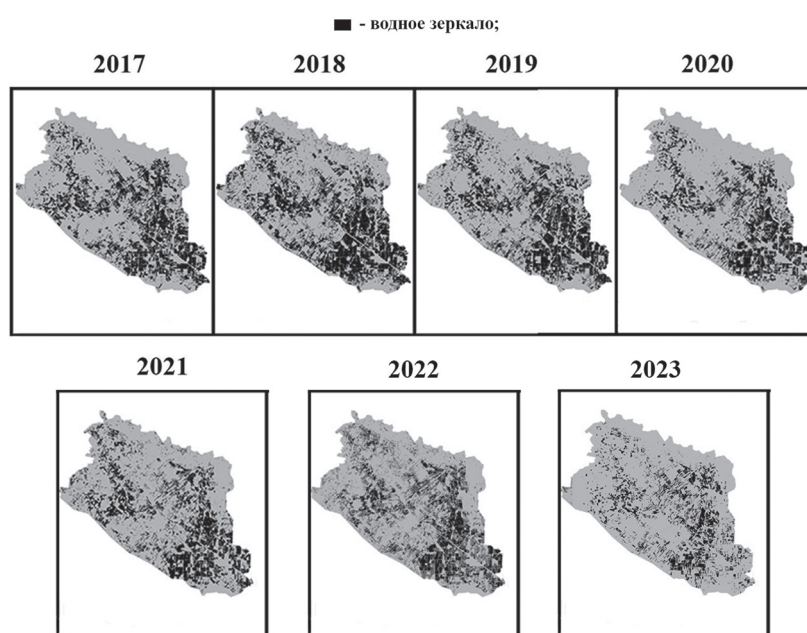


Рис. 2. Зимние (январь–февраль) водные зеркала, сформированные в результате промывки пашни ирригационного массива «Голодная степь» в Казахстане от вторичного засоления. Построено на основе спутниковых данных Sentinel-1, -2 и Landsat-8, -9 периода 2017–2023 гг.

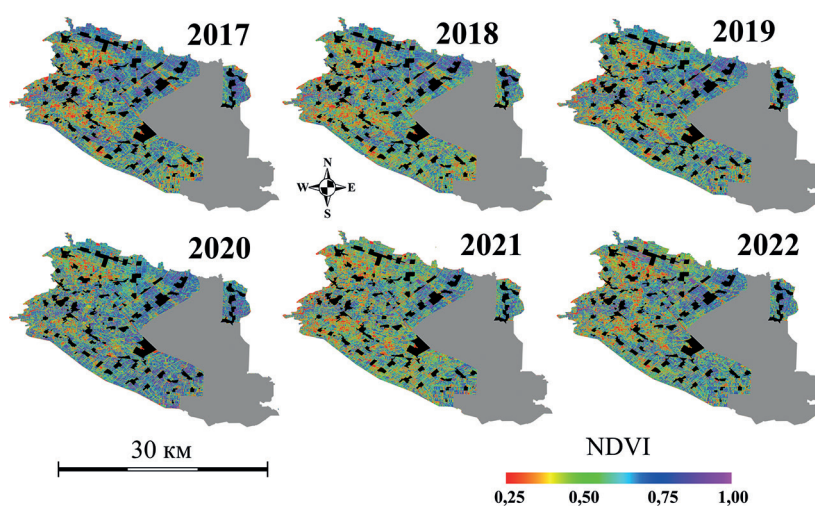


Рис. 3. Сезонные максимумы вегетационного индекса NDVI для анализируемой части ирригационного массива «Голодная степь», Казахстан. Построено на основе спутниковых данных Sentinel-2 (разрешение 10 м) периода 2017–2022 гг.

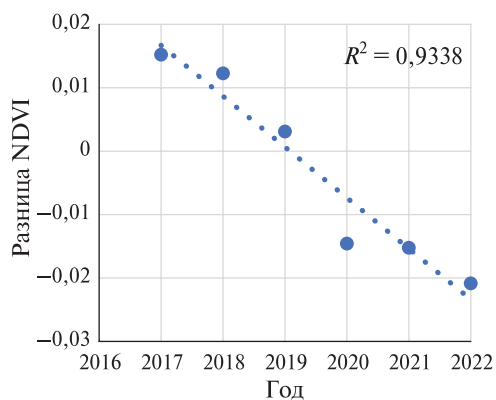


Рис. 4. Анализ изменений в состоянии вегетации различных групп полей в ирригационном массиве «Голодная степь», Казахстан, в период 2017–2022 гг. Разность между средними сезонными максимумами NDVI всех посевов и полями, отправленными на промывку от вторичного засоления после окончания вегетационного сезона. Построено на основе спутниковых данных NDVI/Sentinel-2 (разрешение 10 м)

севообороты сельскохозяйственных культур на пашне, подверженной вторичному засолению, отличаются от севооборотов на незасоленной пашне. Вследствие чего нет хорошей однозначной и прямой связи между сезонными максимумами NDVI и степенью засоления почв. Засоленная пашня может характеризоваться даже значениями NDVI, несколько превышающими средние значения всех посевов, как, например, в 2020–2022 гг. (см. табл. 2).

В бассейне р. Сырдарьи важную роль в растениеводстве играет водность сезона, которая влияет на возможности обеспечения посевов поливом и, соответственно, на уровень вторичного засоления почв. При рассмотрении более крупных территориальных образований, например сельских округов с площадью пашни 3–7 тыс. га или районов с 60–80 тыс. га пашни, значения среднего сезонного максимума NDVI зависят от водности сезона и вторичной засоленности почв. Севообороты района относительно консервативны. Выбор засеваемых культур связан с засоленностью пашни, спросом и ценой на конечную продукцию, наличием инфраструктуры для хранения и продаж, государственной поддержкой: субсидиями на минеральные удобрения, пестициды и гербициды, опытом и оснащённостью фермеров, доступностью льготного дизтоплива и прочими факторами. Влияние суммы всех этих факторов определяет устойчивость регионального растениеводства, его способность эффективно работать в условиях различных температурных режимов и водности сезонов. Состояние ирригационно-дренажной системы поливного земледелия также оказывает большое влияние на производительность сельскохозяйственного сектора. Но на масштабе нескольких лет функциональность поливной инфраструктуры достаточно стабильна. Типичное время её деградации — это десятки лет.

Разница между значениями средних сезонных максимумов NDVI всех полей и полей, выбранных для промывки в следующем сезоне, т.е. наиболее засоленных в текущем году (по мнению фермеров), представляла наибольший интерес. Временной ряд этих значений для периода 2017–2022 гг. характеризуется двумя параметрами. Первый — направленность современных тенденций: разница растёт или уменьшается. Второй — степень детерминированности тренда. Всегда существуют локальные сезонные факторы, влияющие на состояние растениеводства. Среди них есть природные, такие как водность сезона и погодные условия, которые учитываются по большей части автоматически путём использования разницы сезонных максимумов NDVI, а не самих абсолютных значений. Также важны факторы, связанные с государственным администрированием растениеводства, а именно: доступность и качество семенного материала, объём используемых удобрений, гербицидов, ГСМ (горюче-смазочные материалы), доступность финансовых ресурсов (кредитов, субсидий) и пр. В условиях устойчивого растениеводства из значимых остаются только неконтролируемые погодные факторы. При деградации сельскохозяйственного производства будет прогрессировать комплекс негативных тенденций, ухудшающих состояние растительности, что неизбежно найдёт своё отражение в статистических характеристиках временного ряда отличий вегетации засоленных полей.

В результате проведённого исследования было получено, что временной ряд разницы сезонных максимумов NDVI между засоленными (по мнению фермеров) полями и всеми по-

лями характеризуется линейным трендом на относительное улучшение состояния растительности засоленной пашни. Абсолютная оценка на коротком временном ряде недоступна из-за значительного влияния водности сезона и невозможности выделить вклад погодной компоненты в тренде изменений состояния сельскохозяйственной растительности. Достоверность линейной аппроксимации временного тренда весьма высока и составила $R^2 = 0,93$; что, в свою очередь, обеспечило высокое значение критерия Фишера – Снедекора ($F = 56,2$), существенно превышающее табличное критическое значение ($F = 8,47$) для уровня значимости $\alpha = 0,01$. Высокая степень детерминированности указывает на стабильность условий регионального растениеводства. Доступ к полям важных компонентов орошаемого земледелия, влияющих на регистрируемое на спутниках состояние растительности, например удобрений, гербицидов, качественных семян, ГСМ и пр., не имел провалов в отдельные годы периода 2017–2022 гг. При этом достигнутый уровень культуры орошаемого земледелия, очевидно, не является предельным и может быть значительно улучшен, например за счёт внедрения новых влагосберегающих технологий.

Заключение

Нижняя часть бассейна р. Сырдарья относится к территории Казахстана. Для Казахстанского сектора орошаемого земледелия в бассейне р. Сырдарья остаточный принцип в распределении водных речных ресурсов делает особо актуальным вопрос устойчивости регионального растениеводства в условиях рыночной экономики и сезонных погодных вариаций. Официальная статистика, собираемая министерством сельского хозяйства республики, оперирует объёмами произведённой продукции и информацией, предоставляемой самими производителями, что не гарантирует полностью объективную картину. Поэтому важны объективные оценки, основанные на спутниковых данных.

Существующие особенности агротехники возделывания орошаемых культур в ирригационном массиве «Голодная степь» (Казахстан), и в частности практика удаления избытка солей из пахотного и подпахотного горизонтов почвы с помощью зимней промывки, открыли возможности спутникового мониторинга процедуры очистки полей от вторичного засоления. Такое положение дел может служить основой для многолетнего анализа влияния вторичного засоления почв на состояние культурной растительности и, соответственно, получения оценок, хотя и косвенных, устойчивости регионального растениеводства. Полученные результаты говорят об уменьшении разницы сезонных максимумов между засоленными, по мнению фермеров, полями и всеми посевами в период 2017–2022 гг. Тренд этих значений имеет высокую степень детерминации. Такая ситуация указывает на отсутствие в составе обеспечения регионального сельскохозяйственного производства (семена, удобрения, гербициды, ГСМ, финансовые ресурсы и пр.) выраженной нестабильности, провалов отдельных лет, способных значимо повлиять на состояние культур.

Работа выполнена при поддержке грантового и программно-целевого финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проекты № AP 14871126 и BR 10965172.

Литература

1. *Абаев Н. Н., Сагатдинова Г. Н., Маглинец Ю. А. и др.* Спутниковый мониторинг зимней промывки пашни от вторичного засоления на примере ирригационного массива «Голодная степь» (Казахстан) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 152–163. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-152-163.
2. *Денисов П. В., Серeda И. И., Трошко К. А., Лупян Е. А. и др.* Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.

3. *Рамазанов А., Якубов Х.* Промывные и влагозарядные поливы. Ташкент: Мехнат, 1988. 192 с.
4. *Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Лагутин Е. И.* О режимах снежности Центральной Азии в период 2001–2021 гг. // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. № 4. С. 497–504. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-497-504.
5. *Терехов А. Г., Сагатдинова Г. Н., Мурзабаев Б. А.* Принципы региональной оценки многолетней засоленности пашни в Казахском секторе долины реки Сырдарья по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 169–179. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-169-179.
6. *Abdullaev I., Molden D.* Spatial and temporal variability of water productivity in the Syr Darya Basin, central Asia // Water Resources Research. 2004. V. 40. No. 8. DOI: 10.1029/2003WR002364.
7. *Abikenova S., Yespolov T., Rau A. et al.* Water-Saving Technology of Rice Irrigation on Kazakhstan Rice Systems // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. V. 12. No. 3. P. 2459–2465. DOI: 10.13005/bbra/1924.
8. *Bissenbayeva S., Abuduwaili J., Saparova A., Ahmed T.* Long-term variations in runoff of the Syr Darya River Basin under climate change and human activities // J. Arid Land. 2021. V. 13. P. 56–70. DOI: 10.1007/s40333-021-0050-0.
9. *Cai X., McKinney D. C., Rosegrant M. W.* Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region // Agricultural Systems. 2003. V. 76. Iss. 3. P. 1043–1066. DOI: 10.1016/S0308-521X(02)00028-8.
10. *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. Article 100078. DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100078.
11. *Duan Y., Ma L., Abuduwaili J. et al.* Driving Factor Identification for the Spatial Distribution of Soil Salinity in the Irrigation Area of the Syr Darya River, Kazakhstan // Agronomy. 2022. V. 12. No. 8. Article 1912. DOI: 10.3390/agronomy12081912.
12. *Hu Y., Duan W., Chen Y. et al.* An integrated assessment of runoff dynamics in the Amu Darya River Basin: Confronting climate change and multiple human activities, 1960–2017 // J. Hydrology. 2021. V. 603. Pt. A. Article 126905. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126905.
13. *Khan V. M., Holko L.* Snow cover characteristics in the Aral Sea Basin from different data sources and their relation with river runoff // J. Marine Systems. 2009. V. 76. Iss. 3. P. 254–262. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.03.012.
14. *Leng P., Zhang Q., Li F. et al.* Agricultural impacts drive longitudinal variations of riverine water quality of the Aral Sea basin (Amu Darya and Syr Darya Rivers), Central Asia // Environmental Pollution. 2021. V. 284. Article 117405. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117405.
15. *Lioubimtseva E.* A multi-scale assessment of human vulnerability to climate change in the Aral Sea basin // Environ Earth Sciences. 2015. V. 73. P. 719–729. DOI: 10.1007/s12665-014-3104-1.
16. *Lobanova A., Didovets I., Menz Ch. et al.* Rapid assessment of climate risks for irrigated agriculture in two river basins in the Aral Sea Basin // Agricultural Water Management. 2021. V. 243. Article 106381. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106381.
17. *Platonov A., Noble A., Kuziev R.* Soil Salinity Mapping Using Multi-Temporal Satellite Images in Agricultural Fields of Syrdarya Province of Uzbekistan // Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation / eds. Shahid S., Abdelfattah M., Taha F. Dordrecht: Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-5684-7_5.
18. *Sun J., Li Y. P., Suo C., Liu Y. R.* Impacts of irrigation efficiency on agricultural water-land nexus system management under multiple uncertainties — A case study in Amu Darya River basin, Central Asia // Agricultural Water Management. 2019. V. 216. P. 76–88. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.01.025.
19. *Xue J., Su B.* Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications // Sensors. 2017. V. 2017. Article 1353691. DOI: 10.1155/2017/1353691.
20. *Wang X., Chen Y., Li Zh. et al.* The impact of climate change and human activities on the Aral Sea Basin over the past 50 years // Atmospheric Research. 2020. V. 245. Article 105125. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105125.
21. *Zhang J., Chen Y., Li Zh., Song J. et al.* Study on the utilization efficiency of land and water resources in the Aral Sea Basin, Central Asia // Sustainable Cities and Society. 2019. V. 51. Article 101693. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101693.

Satellite estimates of the impact of secondary salinization on agriculture sustainability in irrigated soils of Golodnaya Steppe (Kazakhstan)

A. G. Terekhov¹, G. N. Sagatdinova¹, I. Yu. Savin^{2,3}, E. N. Amirgaliyev¹

¹ Institute of Information and Computational Technologies, Almaty 050010, Kazakhstan
E-mail: aterekhov1@yandex.ru

² V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow 119017, Russia
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

³ Institute of Environmental Engineering of RUDN University, Moscow 115093, Russia
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

Secondary salinization and lack of water resources for large (140 thousand ha) irrigation massif “Golodnaya Steppe” (Kazakhstan), located in the Syrdarya river basin, negatively affects crop cultivation. Assessment of the trend of recent years in the state of agricultural vegetation is of considerable interest. To combat secondary salinization, winter soil washing is practiced in the region. When it is carried out, water mirrors are formed on fields during January-February, which can be registered by satellites. Thus, it is possible operatively identify fields designated for soil washing at the end of the season due to secondary soil salinization. Sentinel-2 satellite data with 10 m resolution for the period 2017–2022 were used to analyze seasonal maximums of NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) for two groups of fields: those with crops of the whole region, and fields with saline soils selected by farmers at the end of the year for winter soil washing. Sentinel-1, -2 and Landsat-8, -9 satellite imagery obtained for January-February 2017–2023 was used as a basis for compiling water surface masks on the fields. The directionality and significance of the trend of the difference between seasonal NDVI maxima for the most saline fields and for all fields in the region was assessed. A decreasing trend of this difference was recorded, with reliability of linear approximation $R^2 = 0.93$, and Fisher-Snedecor factor value $F = 56.2$ ($F = 8.47$; $\alpha = 0.01$). It was found that about 30 % of arable soils in the region are annually washed from secondary salinization. Dynamics of the state of agricultural vegetation on the fields with saline soils during the period 2017–2022 was characterized by pronounced determinism and trend to reduce differences with other fields of the region. Thus, during the last 6 years (2017–2022), crop production in the irrigation massif “Golodnaya Steppe” (Kazakhstan) demonstrated stability of agrotechnical level and resistance to seasonal variations in weather conditions and water content of the Syr Darya River.

Keywords: remote sensing, irrigated cropland, secondary salinization, winter irrigation, River Syr Darya basin, agriculture sustainability

Accepted: 25.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-143-152

References

1. Abayev N. N., Sagatdinova G. N., Maglinats Yu. A. et al., Satellite monitoring of winter irrigation activity in South Kazakhstan: A case study in the irrigated region “Golodnaya Steppe”, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 152–163 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-152-163.
2. Denisov P. V., Sereda I. I., Troshko K. A. et al., Opportunities and experience of operational remote monitoring of winter crops condition in Russia, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 171–185 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
3. Ramazanov A., Yakubov Kh. I., *Promyvnyye i vlagozaryadnye polivy* (Washing and Water-Charging Irrigation), Tashkent: Mekhnat Publ., 1988, 192 p. (in Russian).
4. Terekhov A. G., Abayev N. N., Lagutin E. I., Patterns of the Central Asia snow cover during 2001–2021, *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2021, No. 4, pp. 497–504 (in Russian), DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-497-504.
5. Terekhov A. G., Sagatdinova G. N., Murzabaev B. A., Regional-scale assessment of multi-year soil salinity using MODIS in the Syr Darya River valley, Kazakhstan, *Sovremennyye problemy*

- distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 169–179 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-169-179.
6. Abdullaev I., Molden D., Spatial and temporal variability of water productivity in the Syr Darya Basin, central Asia, *Water Resources Research*, 2004, Vol. 40, No. 8, DOI: 10.1029/2003WR002364.
 7. Abikenova S., Yespolov T., Rau A. et al., Water-Saving Technology of Rice Irrigation on Kazakhstan Rice Systems, *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 2459–2465, DOI: 10.13005/bbra/1924.
 8. Bissenbayeva S., Abuduwaili J., Saparova A., Ahmed T., Long-term variations in runoff of the Syr Darya River Basin under climate change and human activities, *J. Arid Land*, 2021, Vol. 13, pp. 56–70, DOI: 10.1007/s40333-021-0050-0.
 9. Cai X., McKinney D. C., Rosegrant M. W., Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region, *Agricultural Systems*, 2003, Vol. 76, Issue 3, pp. 1043–1066, DOI: 10.1016/S0308-521X(02)00028-8.
 10. 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, Article 100078, DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100078.
 11. Duan Y., Ma L., Abuduwaili J. et al., Driving Factor Identification for the Spatial Distribution of Soil Salinity in the Irrigation Area of the Syr Darya River, Kazakhstan, *Agronomy*, 2022, Vol. 12, No. 8, Article 1912, DOI: 10.3390/agronomy12081912.
 12. Hu Y., Duan W., Chen Y. et al., An integrated assessment of runoff dynamics in the Amu Darya River Basin: Confronting climate change and multiple human activities, 1960–2017, *J. Hydrology*, 2021, Vol. 603, Pt. A, Article 126905, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126905.
 13. Khan V. M., Holko L., Snow cover characteristics in the Aral Sea Basin from different data sources and their relation with river runoff, *J. Marine Systems*, 2009, Vol. 76, Issue 3, pp. 254–262, DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.03.012.
 14. Leng P., Zhang Q., Li F. et al., Agricultural impacts drive longitudinal variations of riverine water quality of the Aral Sea basin (Amu Darya and Syr Darya Rivers), Central Asia, *Environmental Pollution*, 2021, Vol. 284, Article 117405, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117405.
 15. Lioubimtseva E., A multi-scale assessment of human vulnerability to climate change in the Aral Sea basin, *Environ Earth Sciences*, 2015, Vol. 73, pp. 719–729, DOI: 10.1007/s12665-014-3104-1.
 16. Lobanova A., Didovets I., Menz Ch. et al., Rapid assessment of climate risks for irrigated agriculture in two river basins in the Aral Sea Basin, *Agricultural Water Management*, 2021, Vol. 243, Article 106381, DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106381.
 17. Platonov A., Noble A., Kuziev R., Soil Salinity Mapping Using Multi-Temporal Satellite Images in Agricultural Fields of Syrdarya Province of Uzbekistan, In: *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation*, Shahid S., Abdelfattah M., Taha F. (eds), Dordrecht: Springer, 2013, DOI: 10.1007/978-94-007-5684-7_5.
 18. Sun J., Li Y. P., Suo C., Liu Y. R., Impacts of irrigation efficiency on agricultural water-land nexus system management under multiple uncertainties — A case study in Amu Darya River basin, Central Asia, *Agricultural Water Management*, 2019, Vol. 216, pp. 76–88, DOI: 10.1016/j.agwat.2019.01.025.
 19. Xue J., Su B., Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications, *Sensors*, 2017, Vol. 2017, Article 1353691, DOI: 10.1155/2017/1353691.
 20. Wang X., Chen Y., Li Zh. et al., The impact of climate change and human activities on the Aral Sea Basin over the past 50 years, *Atmospheric Research*, 2020, Vol. 245, Article 105125, DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105125.
 21. Zhang J., Chen Y., Li Zh. et al., Study on the utilization efficiency of land and water resources in the Aral Sea Basin, Central Asia, *Sustainable Cities and Society*, 2019, Vol. 51, Article 101693, DOI: 10.1016/j.scs.2019.101693.