

Спутниковый мониторинг зимней промывки пашни от вторичного засоления на примере ирригационного массива «Голодная степь» (Южный Казахстан)

Н. Н. Абаев^{1,4}, Г. Н. Сагатдинова¹, Ю. А. Маглинец²,
Е. Н. Амиргалиев¹, И. Ю. Савин^{3,5}, А. Г. Терехов¹

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

² *Институт космических и информационных технологий СФУ
Красноярск, 660074, Россия
E-mail: maglinets@mail.ru*

³ *Почвенный институт им. В. В. Докучаева, Москва, 119017, Россия
E-mail: savin_iyu@esoil.ru*

⁴ *РГП «Казгидромет», Алматы, 050022, Казахстан
E-mail: abayev_n@meteo.kz*

⁵ *Российский университет дружбы народов, Москва, 115093, Россия
E-mail: savin_iyu@esoil.ru*

В Центральной Азии на территории Казахстана, в бассейне трансграничной р. Сырдарья на границе с Узбекистаном, находится часть (140 тыс. га) крупного массива орошения — «Голодная степь». В регионе практикуется наиболее дешёвый способ ирригации — полив по бороздам. Такая сельскохозяйственная практика требует большого количества воды для ирригации, что способствует поднятию уровня засоленных грунтовых вод и активизирует процессы вторичного засоления полей. Наиболее широко распространённым способом рас-солнения сельскохозяйственных земель в регионе считается относительно недорогая процедура зимней промывки полей. В процессе промывки на пашне формируются водные зеркала, которые могут существовать до нескольких месяцев. При этом чем сильнее засолены поля, тем большее количество воды рекомендуется использовать для промывки почвы. Спутниковый мониторинг водных зеркал, формирующихся в период январь — февраль на территории ирригационного массива, позволяет параметризовать процедуру очистки полей от вторичного засоления. В данном исследовании с помощью системы Google Earth Engine были проанализированы архивы спутниковых данных Landsat-8, 9 и Sentinel-1, -2 за период январь — февраль 2017–2022 гг. Были созданы сезонные маски водных зеркал, накопленные за январь — февраль. Карты отклонений сезонных характеристик от среднего многолетнего уровня представляют собой важную информацию об активности мероприятий по борьбе с вторичным засолением поливной пашни в отдельные годы. Многолетние оценки распространённости водных зеркал в процессе зимней промывки характеризуют средний многолетний уровень вторичной засоленности поливной пашни региона. Полученная в результате исследования информация может представлять интерес в качестве отдельного компонента мониторинга вторичной засоленности пашни региона, а также для планирования мероприятий, направленных на улучшение работы региональной ирригационно-дренажной инфраструктуры.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, водное зеркало, мониторинг поливной пашни, вторичное засоление, зимняя промывка полей

Одобрена к печати: 25.04.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-152-163

Введение

Вторичное засоление пашни — один из ключевых негативных факторов, ограничивающих сельскохозяйственное производство во многих аридных регионах поливного земледелия (Wang Y. et al., 2022). Негативное влияние засоления на сельскохозяйственные культуры связано с повышением осмотического давления в корнеобитаемом слое почвы, что приводит к затруднениям в усвоении воды растениями и, как следствие, к деградации вегетативных

органов (Volkmar et al., 1998). В течение вегетационного сезона с ростом растений увеличивается глубина корнеобитаемого слоя почвы. Для наиболее распространённых сельскохозяйственных культур глубина корнеобитаемого слоя часто достигает 1 м. В течение вегетационного сезона ирригация земель приводит к подъёму засоленных грунтовых вод. При нарушениях работы дренажной системы может происходить засоление корнеобитаемого слоя почвы, вплоть до формирования соляных корок на поверхности почвенного покрова (Laiskhanov et al., 2016).

В научной литературе имеется большое количество работ, посвящённых анализу процессов вторичного засоления пашни с помощью дистанционного зондирования. Однако за почти пятидесятилетнюю историю, начиная с 80-х гг. прошлого века (Мамедов, 1985; Панкова и др., 1978; Singh, Dwivedi, 1989), так и не было разработано надёжного и универсального подхода (Li, 2021). Основные трудности связаны с тем, что дистанционные методы в большинстве своём диагностируют параметры поверхностного слоя почвы, а негативное влияние засоления касается характеристик корнеобитаемого слоя (Abbas et al., 2013; Bannari, Guédon, 2016; Scudiero et al., 2017). Трёхмерные процессы миграции соли в почве во времени имеют сложную, разнонаправленную динамику (Yin et al., 2021) и редко формируют тесные прямые связи со спектральными характеристиками поверхности почвы (Wang N. et al., 2022). В настоящее время региональная стратегия дистанционных оценок вторичной засоленности земель направлена на детальный учёт местных условий, что позволяет в определённых условиях связывать спутниковую информацию с состоянием почвенного покрова (например, (Laiskhanov et al., 2016; Lobell et al., 2010; Rukhovich et al., 2010)).

Вторичное засоление поливной пашни широко распространено в бассейне Аральского моря (Kitamura et al., 2006). Наиболее сильное влияние этот фактор оказывает на поливные земли в среднем и нижнем течении двух основных рек региона (Сырдарьи, Амударьи). Казахская часть ирригационного массива «Голодная степь», расположенная в средней части бассейна р. Сырдарьи, стала территорией исследования в настоящей работе.

Интенсивность вторичного засоления в этом регионе определяется количеством доступной для ирригации воды и эффективностью отвода засоленных грунтовых вод (Rukhovich et al., 2010). Доминирующим методом ирригации в регионе выступает полив по бороздам. Это наиболее дешёвая технология, но при её использовании потребляется большое количество поливных вод, в результате чего возможен существенный рост уровня грунтовых вод. В Центральной Азии из-за резко континентального климата существует значительная естественная вариативность сезонной водности рек, что часто приводит к острой конкуренции за речные ресурсы как между отдельными странами, так и между ирригационными массивами (Терехов, 2020; Терехов и др., 2021; Sorg et al., 2014). В любом случае в средние и маловодные годы поливные массивы Аральского моря испытывают дефицит поливной воды.

После распада СССР региональная ирригационно-дренажная система разделилась на национальные части. В Казахстане недостаток целевого финансирования привёл к частичной деградации дренажной системы ирригационного массива «Голодная степь». Заращение дрен корнями деревьев и других растений, забрасывание дренажных скважин существенно активизировало процессы вторичного засоления. Наиболее эффективным способом восстановления засоленной пашни в ирригационном массиве «Голодная степь» представляется относительно недорогая процедура зимней промывки полей. Аналогичная технология применяется и в других регионах (Li et al., 2020; Pengnian et al., 2016).

В зависимости от уровня осеннего засоления пашни фермеры в процессе подготовки к новому вегетационному сезону определяют для своих полей параметры зимней промывки. Это выбор числа промывок, нормы расхода воды, времени существования водного зеркала, глубины воды на полях и др. Согласно существующим рекомендациям, для сильно засоленных полей на промывку следует подавать от 8000 до 12 000 м³ воды на гектар, за 2–3 такта по 4000 м³/га каждый, в период с декабря по март. В случае слабо засоленных почв рекомендуется проводить только влагозарядковый полив в марте – апреле с нормой 2000–4000 м³/га (Рамазанов, Якубов, 1988). Водные ресурсы в регионе платные, поэтому стратегия фермеров заключается в максимальной очистке полей от вторичного засоления при минимальных объёмах использованной воды.

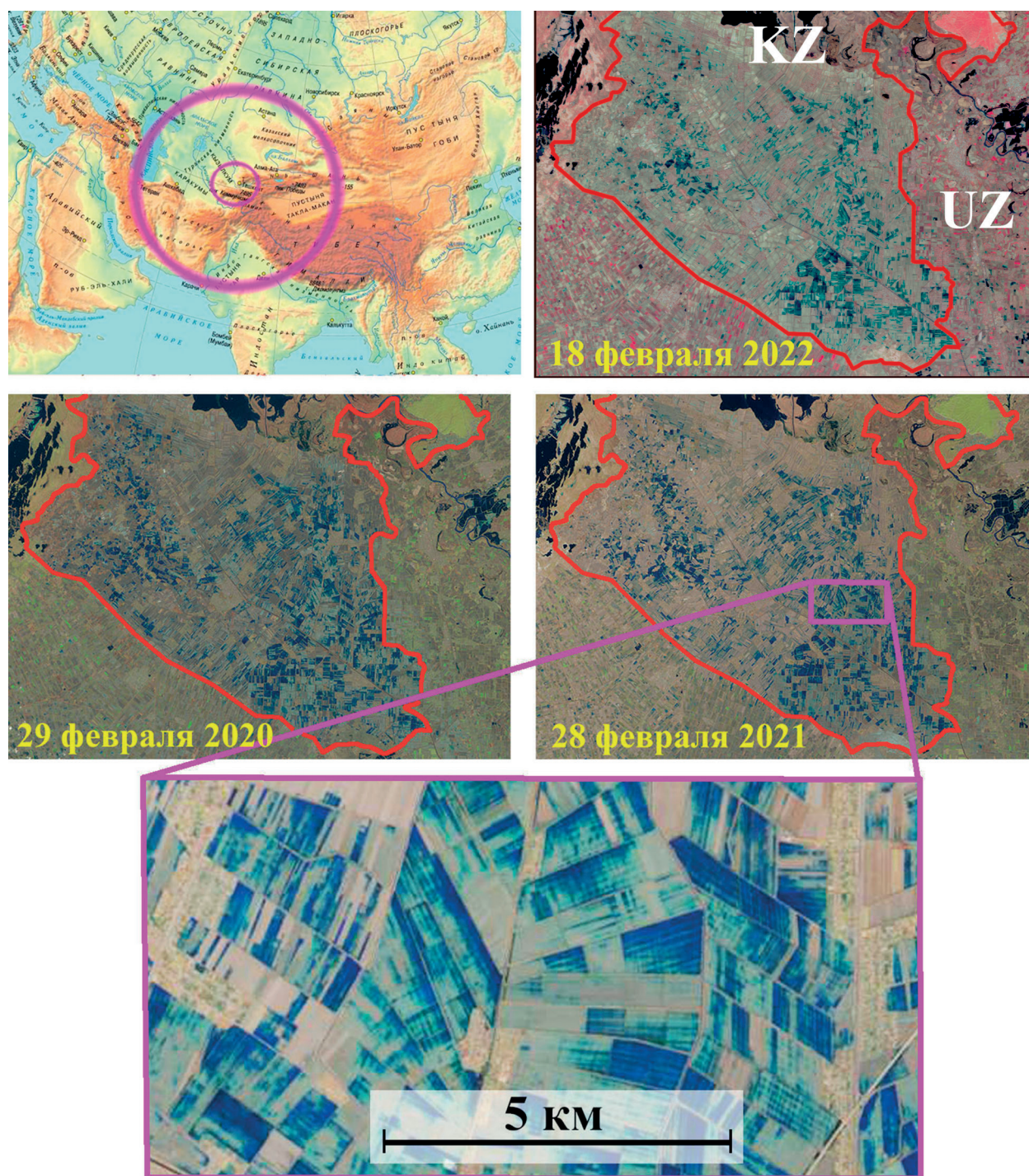


Рис. 1. Казахстанская часть массива орошения «Голодная степь». Псевдоцветные композиты, построенные на базе спутниковой съёмки Sentinel-2

В зимний период водохранилища гидроэлектростанций Нарын-Сырдаринского каскада, расположенные в верхней части бассейна р. Сырдарьи, а именно Токтогульское (19,5 км³, Киргизия), Чарвакское (2,0 км³, Узбекистан), Андижанское (1,9 км³, Узбекистан) и Кайрак-кумское (4,2 км³, Таджикистан), работают в энергетическом режиме на выработку гидроэлектроэнергии, что формирует повышенный объём зимнего стока р. Сырдарьи. Это обстоятельство обеспечивает речной сток, достаточный для проведения масштабных процедур восстановления поливной пашни путём зимней промывки полей (рис. 1). Пространственно-временные характеристики существующих в зимний период водных зеркал диагностируют

активность фермеров по борьбе с вторичным засолением и дают основу для параметризации процедуры зимней промывки полей.

В работе (Терехов и др., 2022) было показано, что некоторые спутниковые продукты среднего разрешения, в частности MODIS-NDVI (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; *англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) и MODIS-NDSI (*англ.* Normalized Difference Salinity Index — нормализованный разностный индекс засоления) (250 м), имеют в рассматриваемом регионе тесную связь с засолением почв. Отмечалось, что причиной регистрируемых зависимостей между NDVI и засолением пашни становятся последствия зимней промывки полей. Промывка полей большим количеством воды уменьшает скорость весеннего прогрева почв (Yang et al., 2016) и сдвигает начало развития вегетации. В связи с этим спутниковый мониторинг и количественный анализ водных зеркал, формирующихся в процессе зимней промывки, также представляют значительный интерес как один из потенциальных путей получения информации о засолённости поливной пашни.

Территория исследования

Трансграничная р. Сырдарья с площадью бассейна более 200 тыс. км² является второй по водному ресурсу (около 30 км³) и первой по длине (более 3000 км) рекой в Центральной Азии. Река собирает воду в хребтах Тянь-Шаня и впадает в Аральское море, в настоящее время — в Малый Арал. Средняя и нижняя часть бассейна р. Сырдарьи относится к территории Казахстана. На границе Казахстана с Узбекистаном находится крупный ирригационный массив «Голодная степь», расположенный южнее Шардаринского вдхр. (5,2 км³, Казахстан). Из этого ирригационного массива на территории Казахстана находится около 140 тыс. га поливной пашни, относящейся к Мактааральскому и Жетысайскому районам Туркестанской обл. (см. *рис. 1*). В настоящем исследовании рассматривались пространственно-временные характеристики водных зеркал на поливной пашне данного региона в январе — феврале 2017–2022 гг.

Исходные материалы и методика обработки данных

В качестве исходных спутниковых данных использовались снимки Landsat-8, -9 (разрешение 30 м) и Sentinel-1, -2 (разрешение 10 м) 2017–2022 гг. Источником информации служили архивы системы Google Earth Engine (GEE). Для территории компактного поливного массива «Голодная степь» Мактааральского и Жетысайского районов Туркестанской обл. проводилась выборка снимков Landsat-8, Sentinel-1, -2 периода 1 января — 1 марта 2017–2022 гг. Снимки проходили этап тематической обработки, которая заключалась в выделении маски водной поверхности. В дальнейшем полученные за сезон (январь — февраль) водные маски объединялись в суммарную маску для каждого года анализируемого периода.

Обработка данных проводилась в среде GEE в формате облачных вычислений. Методика выделения водной поверхности основывалась на пороговых алгоритмах. По данным оптических каналов спутников Landsat-8 и Sentinel-2 рассчитывался индекс NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс) (Воробьёв, Курбанов, 2021; Шинкаренко и др., 2021; McFeeters, 1996; Özelkan, 2020; Xiucheng et al., 2017) и через пороговое значение формировалась маска водной поверхности. Радарные данные Sentinel-1 на территорию Казахстана поставляются в двух поляризациях: вертикально-вертикальной (VV) и вертикально-горизонтальной (VH). Гладкая водная поверхность формирует слабый отражённый сигнал. На базе двух поляризаций создавался третий канал с минимальными значениями этих двух поляризаций. Затем для выделения водного зеркала также применялась пороговая классификация с последующей фильтрацией остаточных спекл-шумов (Craig et al., 2020; Manjusree et al., 2012). Маски, построенные по оптическим и радарным данным, объединялись.

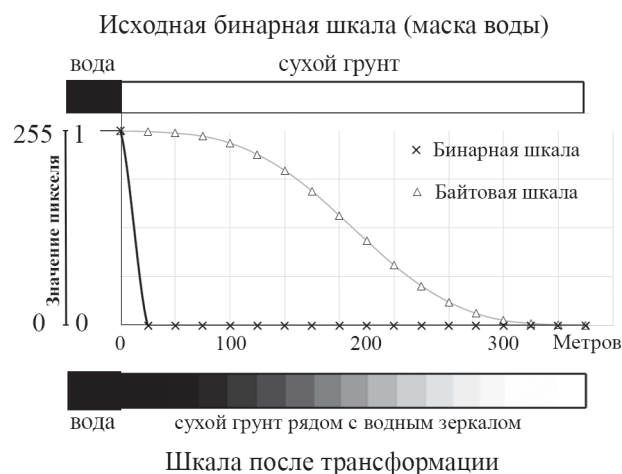


Рис. 2. Схема трансформации бинарной (0–1) шкалы маски водного зеркала (вода–суша) в шкалу 256 значений. Дополнительные значения введены для ранжирования территории суши по признаку близости к водному зеркалу. Пример пиксельного ряда трансекты от границы водного зеркала

Полученные сезонные бинарные маски (вода–суша) проходили процедуру дополнительной трансформации. Цель процедуры — уйти от бинарной шкалы к шкале 256 значений. Бинарная шкала ограничивает возможности анализа. Для временного ряда бинарных изображений можно рассчитать среднее состояние, которое будет иметь физический смысл вероятности регистрации того или иного состояния в каждой пиксельной позиции. Но расчёт отклонений от среднего уровня в таком случае малоинформативен. Бинарное изображение кодирует два состояния, которые при анализе будут представлять собой набор пикселей двух типов: либо многолетних максимумов (пиксели «вода»), либо многолетних минимумов (пиксели «суша»).

Многие поля в исследуемом регионе имеют небольшой уклон, что приводит к накоплению воды в низинах (см. рис. 1). Зеркала на локальных возвышениях существуют относительно недолго, только при высоком уровне воды, и могут быть пропущены при спутниковом мониторинге. Поэтому спутником преимущественно регистрируются устойчивые позиции водных зеркал в локальных низинах. Переход к шкале из 256 значений осуществлялся введением метрики близости к водным зеркалам для пикселей «суша». Эта процедура позволяет отчасти учесть эффект стекания воды с локальных возвышенностей в локальные низины в рамках отдельных полей. Для расширения бинарной шкалы от двух состояний «да–нет» до 256 промежуточных значений использовалась гауссовская функция. Пространственный масштаб влияния водного зеркала на окружающую территорию был принят в 320 м (16 периодов регулярной матрицы с пространственным разрешением 20 м) (рис. 2). Физический смысл 256-градационной шкалы заключался в отображении расстояния от рассматриваемого пикселя класса «суша» до ближайшего водного зеркала. При этом маргинальные значения шкалы — 0 и 255 — соответствовали смыслу первоначальной бинарной шкалы «вода–суша». Переход от бинарных масок водных зеркал к 256-градационной шкале позволял учитывать степень близости территорий к водным зеркалам и открывал возможности для более детального количественного анализа отклонений сезонных условий от среднего многолетнего состояния.

Полученные результаты и обсуждение

На рис. 3–4 (см. с. 157) отображены результаты мониторинга водных зеркал в зимний период (январь–февраль) на поливной пашне Жетысайского и Мактааральского районов Туркестанской обл. Казахстана. В частности, были определены средние многолетние условия (см. рис. 4), а также рассчитаны отклонения сезонных характеристик от среднего многолетнего уровня (см. рис. 3).

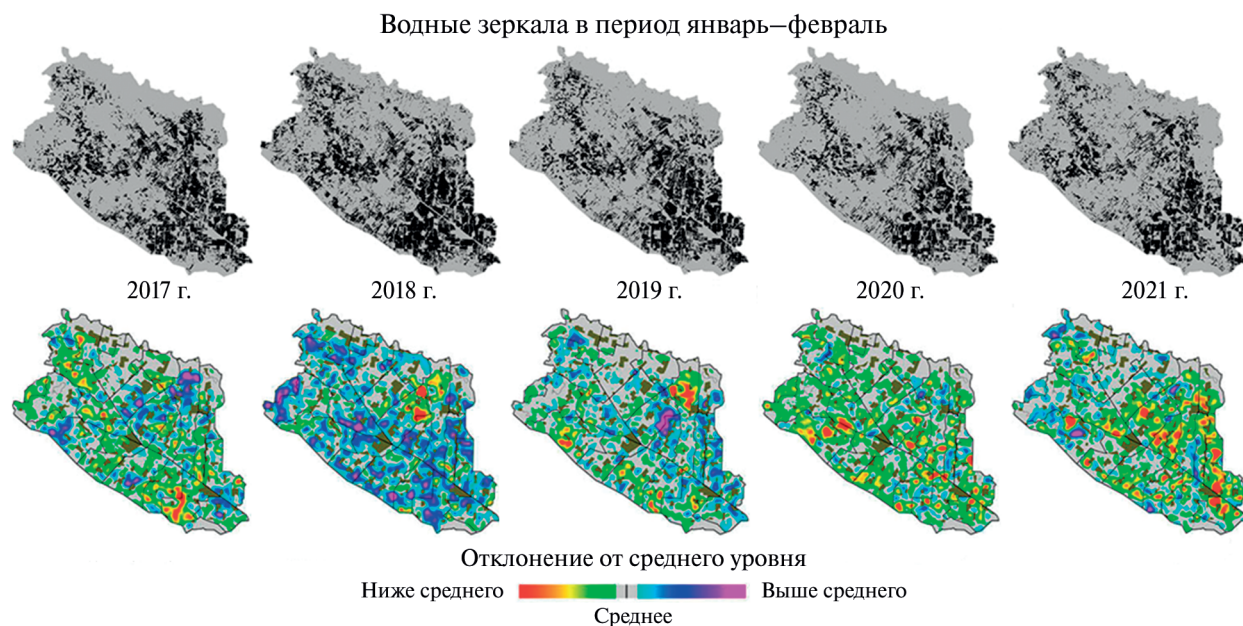


Рис. 3. Спутниковая регистрация водных зеркал периода январь–февраль 2017–2021 гг. в Казахстанской части массива орошения «Голодная степь» с оценками сезонных условий относительно среднего многолетнего уровня

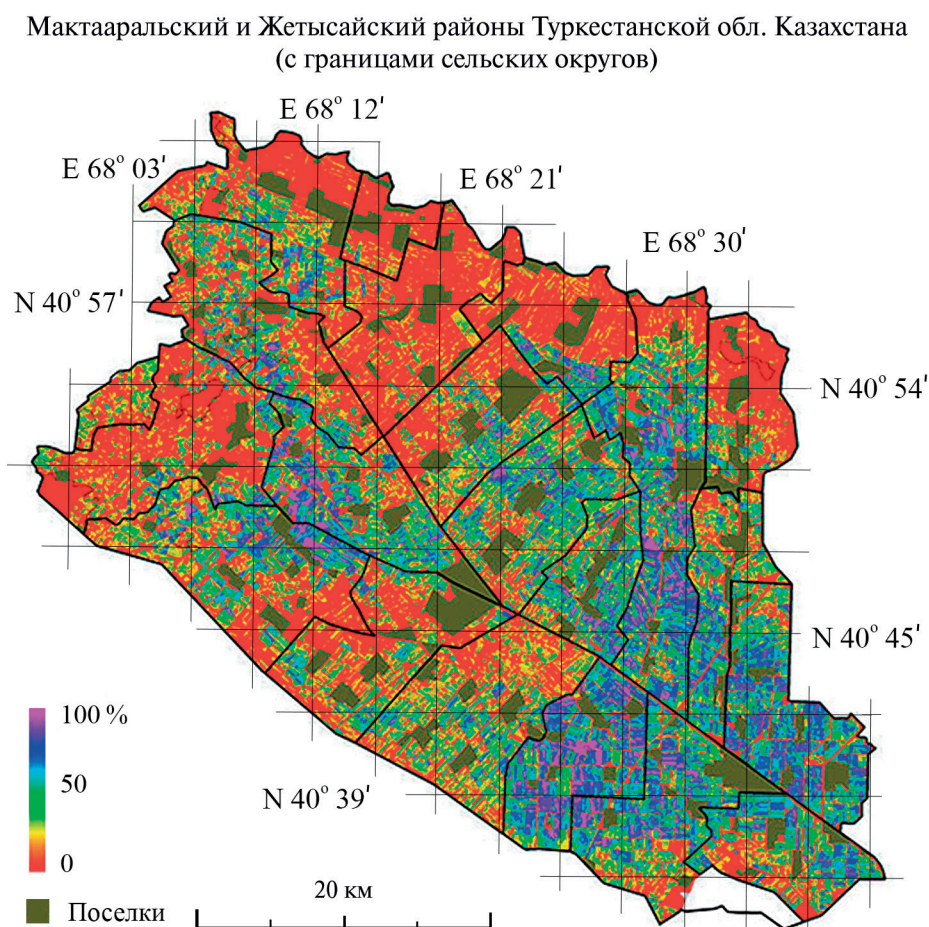


Рис. 4. Средняя многолетняя (2017–2022) вероятность спутниковой (Sentinel-1, -2; Landsat-8) регистрации водных зеркал на пашне Казахстанского сектора поливного массива «Голодная степь» в период январь–февраль

После 2017 г. частота съёмки спутниками Sentinel-1, -2 анализируемой территории в январе – феврале становится достаточно большой. Она включает: 6–8 покрытий Landsat-8, 6–20 сцен Sentinel-1 и 2–12 сцен Sentinel-2. Это позволяет формировать сопоставимые для сравнительного анализа межсезонные оценки, несущие актуальную информацию о пространственно-временных характеристиках водных зеркал на пашне. Что, в свою очередь, тесно связано с уровнем сельскохозяйственного водопользования в зимний период и активностью фермеров по борьбе с вторичным засолением.

Водные зеркала обычно регистрируются по спутниковым данным достаточно чётко. Достоверность и межсезонная сопоставимость результатов спутникового мониторинга водных зеркал зимней промывки полей от вторичного засоления определяется в основном двумя факторами: частотой спутниковой съёмки и температурным режимом. Юг Казахстана характеризуется относительно тёплым климатом. Например, в г. Шымкент средняя температура января составляет $-0,7^{\circ}\text{C}$. Однако волны холода иногда приводят к образованию льда и незначительного снежного покрова, что затрудняет регистрацию спутником водных зеркал. Но в целом высокая частота спутниковой съёмки в период январь – февраль 2017–2022 гг., до 38 покрытий за 60-дневный период наблюдений, и отсутствие устойчивого снежного покрова создают основу для получения устойчивых оценок.

Средняя многолетняя частота зимней промывки отображает закономерные особенности пространственного распределения вторичного засоления полей. Такое засоление обусловлено комбинацией объективных природных и антропогенных факторов. С одной стороны, это рельеф территории (низины подвержены засолению), солёность грунтовых вод и пр. С другой — эффективность работы дренажной системы, состояние дрен и дренажных скважин. Сравнение распределения засоленности поливной пашни по данным наземных обследований с картой средней многолетней частоты зимней промывки демонстрирует наличие тесной связи (рис. 5).

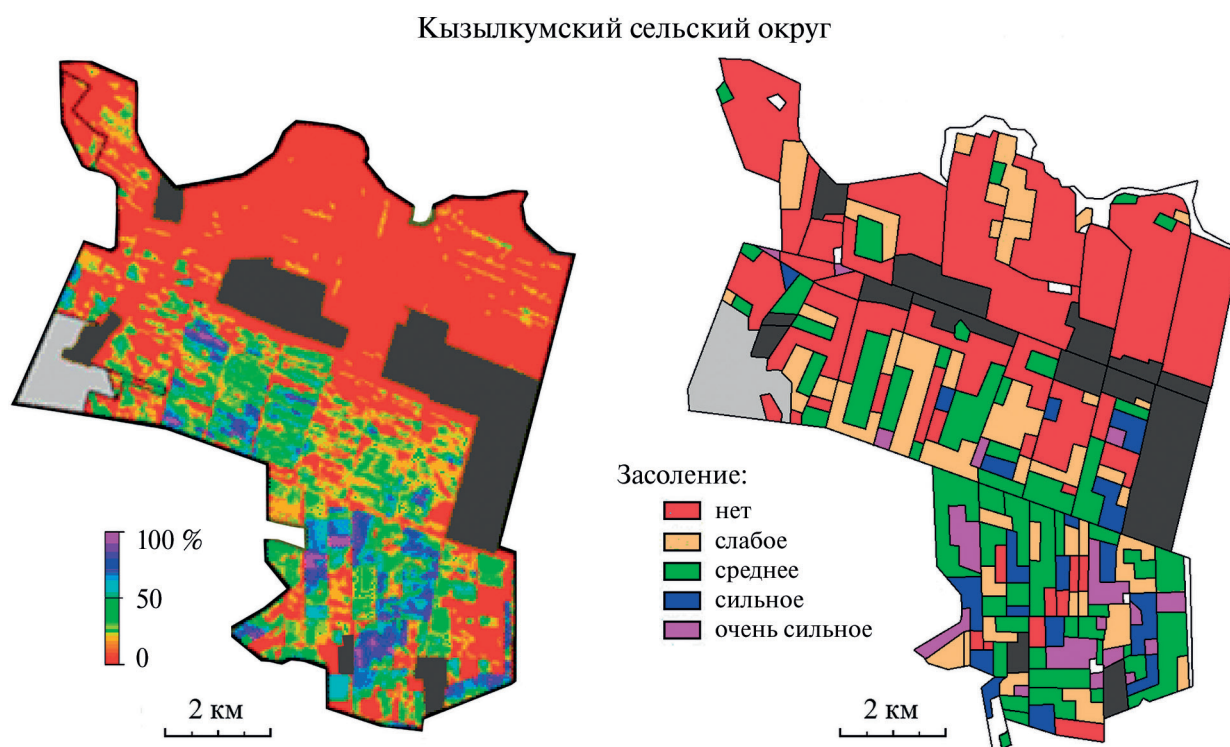


Рис. 5. Сравнение средней многолетней частоты зимней промывки поливной пашни (вероятность регистрации водного зеркала, *слева*) с её засолением по данным наземного обследования 2019 г. (материалы Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан, *справа*) на примере отдельного сельского округа Жетысайского р-на Туркестанской обл. Казахстана

Заключение

Доминирование технологии зимней промывки полей поливной пашни от вторичного засоления в сельскохозяйственной практике землепользования в Жетысайском и Мактааральском районах Туркестанской обл. Казахстана открывает возможности для спутникового мониторинга этой сельскохозяйственной процедуры. Информация о зимнем водопотреблении представляется практически важной для обеспечения эффективного администрирования регионального водопользования и контроля над процедурами очистки поливной пашни от вторичного засоления.

В настоящее время водопользование в зоне поливного земледелия юга Казахстана в климатических условиях дефицита ресурсов поверхностного стока контролируется лишь в сети наземных водомерных пунктов, что оставляет вопросы к достоверности этой информации. Объективные спутниковые оценки распространённости водных зеркал в процессе зимней промывки полей имеют потенциал для полезного вклада в развитие системы мониторинга вторичной засоленности пашни и сельскохозяйственного водопотребления на юге Казахстана.

Работа выполнена при поддержке грантового и программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, проекты № AP14871126 и BR10965172.

Литература

1. Воробьёв О. Н., Курбанов Э. А. Оценка затопления растительного покрова в республиках Марий Эл и Чувашия при подъёме Чебоксарского водохранилища до отметки 68 м по данным ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 214–225. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-214-225.
2. Мамедов Э. А. Изучение засоленных земель и солончаков с помощью космических методов // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 1. С. 60–61.
3. Панкова Е. И., Мазиков В. М., Исаев В. А., Ямнова И. А. Опыт использования аэрофотоснимков для характеристики засоления почв неорошаемых территорий сероземной зоны // Почвоведение. 1978. № 3. С. 82–85.
4. Рамазанов А., Якубов Х. Промывные и влагозарядные поливы. Ташкент: Изд-во «Мехнат», 1988. 192 с.
5. 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.
6. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Маглинец Ю. А. Спутниковый мониторинг состояния оазисов реки Амударья в период 2003–2020 гг. на основе анализа эффекта охлаждения пашни в результате ирригации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 123–132. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132.
7. 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.
8. Шинкаренко С. С., Солодовников Д. А., Барталев С. А., Васильченко А. А., Выприцкий А. А. Динамика площадей водохранилищ полуострова Крым // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 226–241. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241.
9. Abbas A., Khan S., Hussain N., Hanjra M. A., Akbar S. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach // Physics and Chemistry of the Earth. 2013. V. 55–57. P. 43–52. DOI: 10.1016/j.pce.2010.12.004.
10. Bannari A., Guédon A. M. Communications in soil science and plant analysis mapping slight and moderate saline soils in irrigated agricultural land using advanced land imager sensor (EO-1) data and semi-empirical models // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2016. V. 47. P. 1883–1906. DOI: 10.1080/00103624.2016.1206919.

11. *Craig M., Merchant M., Boychuk L., Hopkinson Ch., Brisco B.* Automated SAR image thresholds for water mask production in Alberta's Boreal Region // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 14. Art. No. 2223. DOI: 10.3390/rs12142223.
12. *Kitamura Y., Yano T., Honna T., Yamamoto S., Inosako K.* Causes of farmland salinization and remedial measures in the Aral Sea basin — Research on water management to prevent secondary salinization in rice-based cropping system in arid land // *Agricultural Water Management*. 2006. V. 85. Iss. 1–2. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.03.007.
13. *Laiskhanov S. U., Otarov A., Savin I. Y., Tanirbergenov S. I., Mamutov Z. U., Duisekov S. N., Zhogolev A.* Dynamics of soil salinity in irrigation areas in South Kazakhstan // *Polish J. Environmental Studies*. 2016. V. 25. P. 2469–2475. DOI: 10.15244/pjoes/61629.
14. *Li Y.* Research Progress of Remote Sensing Monitoring of Soil Salinization // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 692. Art. No. 042007. DOI: 10.1088/1755-1315/692/4/042007.
15. *Li L., Liu H., He X., Lin E., Yang G.* Winter Irrigation Effects on Soil Moisture, Temperature and Salinity, and on Cotton Growth in Salinized Fields in Northern Xinjiang, China // *Sustainability*. 2020. V. 12. Art. No. 7573. DOI: 10.3390/su12187573.
16. *Lobell D. B., Lesch S. M., Corwin D. L., Ulmer M. G., Anderson K. A., Potts D. J., Doolittle J. A., Matos M. R., Baltes M. J.* Regional-scale Assessment of Soil Salinity in the Red River Valley Using Multi-year MODIS EVI and NDVI // *Environmental Quality*. 2010. V. 39. Iss. 1. P. 35–41. DOI: 10.2134/jeq2009.0140.
17. *Manjusree P., Kumar L. P., Bhatt Ch. M., Rao G. S., Bhanumurthy V.* Optimization of Threshold Ranges for Rapid Flood Inundation Mapping by Evaluating Backscatter Profiles of High Incidence Angle SAR Images // *Intern. J. Disaster Risk Science*. 2012. V. 3. No. 2. P. 113–122. DOI: 10.1007/s13753-012-0011-5.
18. *McFeeters S. K.* The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // *Intern. J. Remote Sensing*. 1996. V. 17. No. 7. P. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
19. *Özelkan E.* Water Body Detection Analysis Using NDWI Indices Derived from Landsat-8 OLI // *Polish J. Environmental Studies*. 2020. V. 29. No. 2. P. 1759–1769. DOI: 10.15244/pjoes/110447.
20. *Pengnian Y., Zia-Khan S., Wei G., Zhong R., Aguila M.* Winter Irrigation Effects in Cotton Fields in Arid Inland Irrigated Areas in the North of the Tarim Basin, China // *Water*. 2016. V. 8. Iss. 2. Art. No. 47. DOI: 10.3390/w8020047.
21. *Rukhovich D. I., Pankova E. I., Chernousenko G. I., Koroleva P. V.* Long-term salinization dynamics in irrigated soils of the Golodnaya Steppe and methods of their assessment on the basis of remote sensing data // *Eurasian Soil Science*. 2010. V. 43. P. 682–692. DOI: 10.1134/S1064229310060098.
22. *Scudiero E., Corwin D. L., Anderson R. G., Yemoto K., Clary W., Luke Z., Todd W.* Remote sensing is a viable tool for mapping soil salinity in agricultural lands // *California Agriculture*. 2017. V. 71. No. 4. P. 231–238. DOI: 10.3733/ca.2017a0009.
23. *Singh A. N., Dwivedi R. S.* Delineation of salt-affected soils through digital analysis of Landsat MSS data // *Remote Sensing*. 1989. V. 10. No. 1. P. 83–92. DOI: 10.1080/01431168908903849.
24. *Sorg A., Mosello B., Shalpykova G., Allan A., Clarvis M. H., Stoffel M.* Coping with changing water resources: The case of the Syr Darya river basin in Central Asia // *Environmental Science and Policy*. 2014. V. 43. P. 68–77. DOI: 10.1016/j.envsci.2013.11.003.
25. *Volkmar K. M., Hu Y., Steppuhn H.* Physiological responses of plants to salinity: A review // *Canadian J. Plant Science*. 1998. V. 78. No. 1. P. 19–27. DOI: 10.4141/P97-020.
26. *Wang N., Peng J., Xue J., Zhang X., Huang J., Biswas A., He Y., Shi Zh.* A framework for determining the total salt content of soil profiles using time-series Sentinel-2 images and a random forest-temporal convolution network // *Geoderma*. 2022. V. 409. Art. No. 115656. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115656.
27. *Wang Y., Zhao Y., Yan L., Deng W., Zhai J., Chen M., Zhou F.* Groundwater regulation for coordinated mitigation of salinization and desertification in arid areas // *Agricultural Water Management*. 2022. V. 271. Art. No. 107758. DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107758.
28. *Xiucheng Y., Zhao S., Qin X., Zhao N., Liang L.* Mapping of Urban Surface Water Bodies from Sentinel-2 MSI Imagery at 10 m Resolution via NDWI-Based Image Sharpening // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 6. Art. No. 596. DOI: 10.3390/rs9060596.
29. *Yin X., Feng Q., Zheng X., Zhu M., Wu X., Guo Y., Wu M., Li Y.* Spatio-temporal dynamics and eco-hydrological controls of water and salt migration within and among different land uses in an oasis-desert system // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 772. Art. No. 145572. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145572.

Satellite monitoring of winter irrigation activity in South Kazakhstan: A case study of Golognaya Step irrigated region

N. N. Abayev^{1,4}, G. N. Sagatdinova¹, Yu. A. Maglinets², E. N. Amirgaliyev¹,
I. Yu. Savin^{3,5}, A. G. Terekhov¹

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

² *SibFU Institute of Space and Information Technologies, Krasnoyarsk 660074, Russia*
E-mail: maglinets@mail.ru

³ *V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow 119017, Russia*
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

⁴ *RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan*
E-mail: abayev_n@meteo.kz

⁵ *RUDN University, Moscow 115093, Russia*
E-mail: savin_iyu@esoil.ru

The Kazakh part of a large irrigated area called Golodnaya Step is located in the Syr Darya River basin on the state border with Uzbekistan. In this region, the cheapest agricultural practice of furrow irrigation is used. This agrotechnology uses a significant amount of irrigation water, which causes a rise of saline groundwater level and activates the processes of secondary soil salinization. The regional approach of washing the saline soils on irrigated land is a procedure of winter irrigation. During winter irrigation, water mirrors are formed. Mirrors can exist for up to several months. The higher soil salinity, the more washing water it is recommended to use during winter irrigation. Satellite registration of the January–February water mirrors allows us to quantitatively characterize the procedure of washing soil salinity. In this research, the Landsat-8, -9 and Sentinel-1, -2 archives for the period January–February 2017–2022 were analyzed using Google Earth Engine. Seasonal January–February water mirror masks were created, average long-term conditions and seasonal deviations from them were calculated. Maps of deviations from the average long-term condition represent important information about the seasonal farming activity of soil salinity washing. Long-term average estimates of winter irrigation activity characterize the average long-term level of secondary soil salinity in the region. These research results may be of interest as a separate component of soil salinity monitoring, as well as for planning improvements to the regional irrigation and drainage infrastructure.

Keywords: remote sensing, water mirror, monitoring of irrigated arable land, secondary soil salinity, winter irrigation

Accepted: 25.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-152-163

References

1. Vorobiev O. N., Kurbanov E. A., Assessment of vegetation cover flooding in the republics of Mari El and Chuvashia in case of Cheboksary Reservoir rise to a mark of 68 m with the use of remote sensing, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 214–225 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-214-225.
2. Mamedov E. A., The study of saline soil and salt marshes using space techniques, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1985, No. 1, pp. 60–61 (in Russian).
3. Pankova E. I., Mazikov V. M., Isaev V. A., Zhamnova I. A., Experience in the use of aerial photographs for the characteristics of soil salinity rainfed areas serozem area, *Pochvovedenie*, 1978, No. 3, pp. 82–85 (in Russian).
4. Ramazanov A., Yakubov Kh. I., *Promyvnyye i vlagozaryadnye polivy* (Washing and Water-Charging Irrigation), Tashkent: Mekhnat Publ., 1988, 192 p. (in Russian).
5. 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.

6. Terekhov A. G., Abayev N. N., Maglinets Yu. A., Satellite monitoring of River Amu Darya oases during 2003–2020 based on irrigation cooling effect, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 123–132 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-123-132.
7. 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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 169–179 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-169-179.
8. Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Bartalev S. A., Vasilchenko A. A., Vypritskii A. A., Dynamics of the reservoir's areas of the Crimean Peninsula, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 226–241 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241.
9. Abbas A., Khan S., Hussain N., Hanjra M., Akbar S., Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach, *Physics and Chemistry of the Earth*, 2013, Vol. 55–57, pp. 43–52, DOI: 10.1016/j.pce.2010.12.004.
10. Bannari A., Guédon A. M., Communications in soil science and plant analysis mapping slight and moderate saline soils in irrigated agricultural land using advanced land imager sensor (EO-1) data and semi-empirical models, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2016, Vol. 47, pp. 1883–1906, DOI: 10.1080/00103624.2016.1206919.
11. Craig M., Merchant M., Boychuk L., Hopkinson Ch., Brisco B., Automated SAR image thresholds for water mask production in Alberta's Boreal Region, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 14, Art. No. 2223, DOI: 10.3390/rs12142223.
12. Kitamura Y., Yano T., Honna T., Yamamoto S., Inosako K., Causes of farmland salinization and remedial measures in the Aral Sea basin — Research on water management to prevent secondary salinization in rice-based cropping system in arid land, *Agricultural Water Management*, 2006, Vol. 85, Issue 1–2, pp. 1–14, DOI: 10.1016/j.agwat.2006.03.007.
13. Laishanov S. U., Otarov A., Savin I. Y., Tanirbergenov S. I., Mamutov Z. U., Duisekov S. N., Zhogolev A., Dynamics of soil salinity in irrigation areas in South Kazakhstan, *Polish J. Environmental Studies*, 2016, Vol. 25, pp. 2469–2475, DOI: 10.15244/pjoes/61629.
14. Li Y., Research Progress of Remote Sensing Monitoring of Soil Salinization, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 692, Art. No. 042007, DOI: 10.1088/1755-1315/692/4/042007.
15. Li L., Liu H., He X., Lin E., Yang G., Winter Irrigation Effects on Soil Moisture, Temperature and Salinity, and on Cotton Growth in Salinized Fields in Northern Xinjiang, China, *Sustainability*, 2020, Vol. 12, Art. No. 7573, DOI: 10.3390/su12187573.
16. Lobell D. B., Lesch S. M., Corwin D. L., Ulmer M. G., Anderson K. A., Potts D. J., Doolittle J. A., Matos M. R., Baltes M. J., Regional-scale Assessment of Soil Salinity in the Red River Valley Using Multi-year MODIS EVI and NDVI, *Environmental Quality*, 2010, Vol. 39, Issue 1, pp. 35–41, DOI: 10.2134/jeq2009.0140.
17. Manjusree P., Kumar L. P., Bhatt Ch. M., Rao G. S., Bhanumurthy V., Optimization of Threshold Ranges for Rapid Flood Inundation Mapping by Evaluating Backscatter Profiles of High Incidence Angle SAR Images, *Intern. J. Disaster Risk Science*, 2012, Vol. 3, No. 2, pp. 113–122, DOI: 10.1007/s13753-012-0011-5.
18. McFeeters S. K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 7, pp. 1425–1432, DOI: 10.1080/01431169608948714.
19. Özelkan E., Water Body Detection Analysis Using NDWI Indices Derived from Landsat-8 OLI, *Polish J. Environmental Studies*, 2020, Vol. 29, No. 2, pp. 1759–1769, DOI: 10.15244/pjoes/110447.
20. Pengnian Y., Zia-Khan S., Wei G., Zhong R., Aguila M., Winter Irrigation Effects in Cotton Fields in Arid Inland Irrigated Areas in the North of the Tarim Basin, China, *Water*, 2016, Vol. 8, Issue 2, Art. No. 47, DOI: 10.3390/w8020047.
21. Rukhovich D. I., Pankova E. I., Chernousenko G. I., Koroleva P. V., Long-term salinization dynamics in irrigated soils of the Golodnaya Steppe and methods of their assessment on the basis of remote sensing data, *Eurasian Soil Science*, 2010, Vol. 43, pp. 682–692, DOI: 10.1134/S1064229310060098.
22. Scudiero E., Corwin D. L., Anderson R. G., Yemoto K., Clary W., Luke Z., Todd W., Remote sensing is a viable tool for mapping soil salinity in agricultural lands, *California Agriculture*, 2017, Vol. 71, No. 4, pp. 231–238, DOI: 10.3733/ca.2017a0009.
23. Singh A. N., Dwivedi R. S., Delineation of salt-affected soils through digital analysis of Landsat MSS data, *Remote Sensing*, 1989, Vol. 10, No. 1, pp. 83–92, DOI: 10.1080/01431168908903849.
24. Sorg A., Mosello B., Shalpykova G., Allan A., Clarvis M. H., Stoffel M., Coping with changing water resources: The case of the Syr Darya river basin in Central Asia, *Environmental Science and Policy*, 2014, Vol. 43, pp. 68–77, DOI: 10.1016/j.envsci.2013.11.003.
25. Volkmar K. M., Hu Y., Steppuhn H., Physiological responses of plants to salinity: A review, *Canadian J. Plant Science*, 1998, Vol. 78, No. 1, pp. 19–27, DOI: 10.4141/P97-020.

26. Wang N., Peng J., Xue J., Zhang X., Huang J., Biswas A., He Y., Shi Zh., A framework for determining the total salt content of soil profiles using time-series Sentinel-2 images and a random forest-temporal convolution network, *Geoderma*, 2022, Vol. 409, Art. No. 115656, DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115656.
27. Wang Y., Zhao Y., Yan L., Deng W., Zhai J., Chen M., Zhou F., Groundwater regulation for coordinated mitigation of salinization and desertification in arid areas, *Agricultural Water Management*, 2022, Vol. 271, Art. No. 107758, DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107758.
28. Xiucheng Y., Zhao S., Qin X., Zhao N., Liang L., Mapping of Urban Surface Water Bodies from Sentinel-2 MSI Imagery at 10 m Resolution via NDWI-Based Image Sharpening, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 6, Art. No. 596, DOI: 10.3390/rs9060596.
29. Yin X., Feng Q., Zheng X., Zhu M., Wu X., Guo Y., Wu M., Li Y., Spatio-temporal dynamics and eco-hydrological controls of water and salt migration within and among different land uses in an oasis-desert system, *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 772, Art. No. 145572, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145572.