

Принципы региональной оценки многолетней засоленности пашни в Казахском секторе долины реки Сырдарьи по данным MODIS

А. Г. Терехов¹, Г. Н. Сагатдинова¹, Б. А. Мурзабаев²

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

² *Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова
Шымкент, 160012, Казахстан
E-mail: bolat101955@mail.ru*

В Центральной Азии в бассейне р. Сырдарьи расположен крупный массив орошения Голодной степи с общей площадью около 10 тыс. км². Нижняя часть массива, а это около 140 тыс. га поливной пашни, относится к территории Казахстана. После распада СССР гидроэлектростанции в верховьях речного бассейна изменили режим работы с ирригационного на энергетический. Кроме того, региональная дренажная система во многих местах частично потеряла функциональность. Всё это способствовало активизации процессов вторичного засоления поливной пашни. В данном исследовании в качестве основы для регионального картирования среднего многолетнего засоления поливной пашни Казахского сектора ирригационного массива Голодной степи были протестированы два индекса (нормализованные дифференциальные индексы вегетации и засоления NDVI и NDSI), построенные на основе спутниковых данных продукта MODIS MCD43A4 периода апрель–июль 2001–2021 гг. Для калибровки спутниковых данных использовалась официальная информация по засолённости почв сельских округов (административная единица с площадью пашни 4–11 тыс. га) Мактааральского и Жетысайского районов Туркестанской обл. Казахстана периода 2007–2021 гг. в формате суммарной доли незасоленной и малозасоленной пашни. Было установлено, что наиболее тесную корреляционную связь с многолетней засоленностью поливной пашни региона имеет средний многолетний максимум NDVI периода 20 июня–5 июля (коэффициент корреляции Пирсона $R^2 = 0,88$), а также средние многолетние максимумы NDSI периодов 10–25 апреля ($R^2 = 0,85$) и 26 июня–10 июля ($R^2 = 0,87$). Также регистрируется тесная корреляционная связь между рассмотренными индексами с коэффициентом корреляции Пирсона до 0,97. Физической основой, связывающей спутниковые данные со вторичным засолением почв, по всей видимости, представляется процедура зимне-весенней промывки полей, которая в процессе удаления солей приводит к весеннему переувлажнению почв и задержкам в раннем развитии сельскохозяйственной вегетации. Таким образом, средние многолетние значения спутниковых индексов NDVI и NDSI, построенные на базе данных MODIS MCD43A4, в определённые календарные даты могут служить основой для регионального картирования средней многолетней засоленности поливной пашни. Одной из важных целей картирования может быть выделение зон, систематически подвергающихся вторичному засолению.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг поливной пашни, вторичное засоление, зимняя промывка полей, картирование засоленности пашни

Одобрена к печати: 27.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-169-179

Введение

Спутниковые данные широко используются для картирования засоленности территорий (Li, 2021). Несмотря на длительную историю использования данных дистанционного зондирования, а первые работы относятся ещё к 80-м гг. прошлого столетия (Мамедов 1985; Панкова и др., 1978; Singh, Dwivedi, 1989), не удалось разработать надёжных и универсальных подходов к спутниковым оценкам степени засоления почвенного покрова (Metternicht, Zinck, 2003). Подавляющее большинство работ в этой области относится к анализу засолен-

ности природных территорий, характеризующихся относительной стабильностью состояния, как с помощью спутниковых данных сверхвысокого (Alexakis et al., 2018; Allbed et al., 2014) и высокого (Fan et al., 2016; Rahmati, Hamzehpour, 2017; Ramos et al., 2020), так и среднего (Whitney et al., 2018; Zare et al., 2019; Zhang, 2015) пространственного разрешения.

В случае оценки вторичной засоленности поливных пахотных земель задача значительно усложняется (Abbas et al., 2013; Adejumbi et al., 2016; Bannari, Guédon, 2016; Scudiero et al., 2017). В рамках регионального подхода одновременно приходится иметь дело с различными культурами, севооборотами и сельскохозяйственными практиками. На фоне потенциально высокой динамичности уровня вторичного засоления в течение вегетационного сезона (Rukhovich et al., 2010) имеет место большое многообразие состояний почвенной поверхности, связанное с сельскохозяйственной практикой. Таким образом, трудно найти универсальные параметры подстилающей поверхности, имеющие тесные связи с засоленностью почв, особенно на региональном масштабе. Вследствие этого имеется очень ограниченное число работ, ставящих задачу оценки вторичной засоленности поливных пахотных земель на региональном масштабе (Laishanov et al., 2016; Lobell et al., 2010). Также развиваются направления косвенных оценок параметров, связанных с водопотреблением поливной пашни (например, работы (Терехов, 2020; Терехов и др., 2021; Terekhov, Abayev, 2020)).

Крупный массив орошения Голодной степи с общей площадью около 10 тыс. км² расположен в бассейне трансграничной р. Сырдарьи. Река входит в бассейн Аральского моря и занимает второе место в Центральной Азии (после р. Амударьи) по объёму годового стока — 23 км³. Территориально основные площади поливной пашни этого массива орошения относятся к Узбекистану (верхняя часть) и Казахстану (нижняя часть). После распада СССР вышерасположенные гидроузлы с водохранилищами, в частности Кайракумским (4,2 км³, Таджикистан) и Токтогульским (19,5 км³, Киргизия), изменили режим работы с ирригационного на энергетический. Таким образом, часть речного стока стала использоваться на выработку электроэнергии в холодный период. Это заметно снизило водный потенциал ирригационного сезона. Кроме того, после распада СССР активизировались процессы деградации дренажной системы, выражающиеся в заиливании дрен и забрасывании дренажных скважин. В результате в последние десятилетия имеет место развитый процесс вторичного засоления пашни Голодной степи. Определение принципов обзорного картирования вторичного засоления поливной пашни в Казахском секторе массива Голодной степи на основе многолетних спутниковых данных стало целью данного исследования.

Территория обследования

В Казахском секторе массива орошения Голодной степи находится около 140 тыс. га поливной пашни. Административно эти пахотные земли относятся к двум районам Туркестанской обл. Казахстана: Мактааральскому и Жетысайскому (рис. 1, см. с. 171). До 2018 г. это был один район — Мактааральский. По принятой в Казахстане системе административного деления районы области делятся на сельские округа (с/о) с площадью пашни в 4–11 тыс. га. Мактааральский и Жетысайский районы в настоящее время суммарно включают 20 сельских округов (таблица). При этом границы подавляющей части округов не были изменены в результате административной реорганизации 2018 г., что позволяет привлекать историческую официальную статистику по засолению почв.

Однолетние пропашные культуры доминируют на поливной пашне в Мактааральском и Жетысайском районах Туркестанской обл. Основные культуры: хлопок, пшеница, кукуруза, бахчевые, люцерна и пр. Относительно незначительные площади отведены под рисовую культуру. Из рассмотрения было исключено семь сельских округов. В четырёх из них доминируют посевы риса (см. № 17–20 таблицы), три округа (№ 11, 12, 15) были отсеяны из-за нетипичности динамики многолетних спектральных характеристик по невыясненным причинам. Таким образом, в работе рассматривалось 13 сельскохозяйственных территорий с общей площадью около 100 тыс. га поливной пашни.

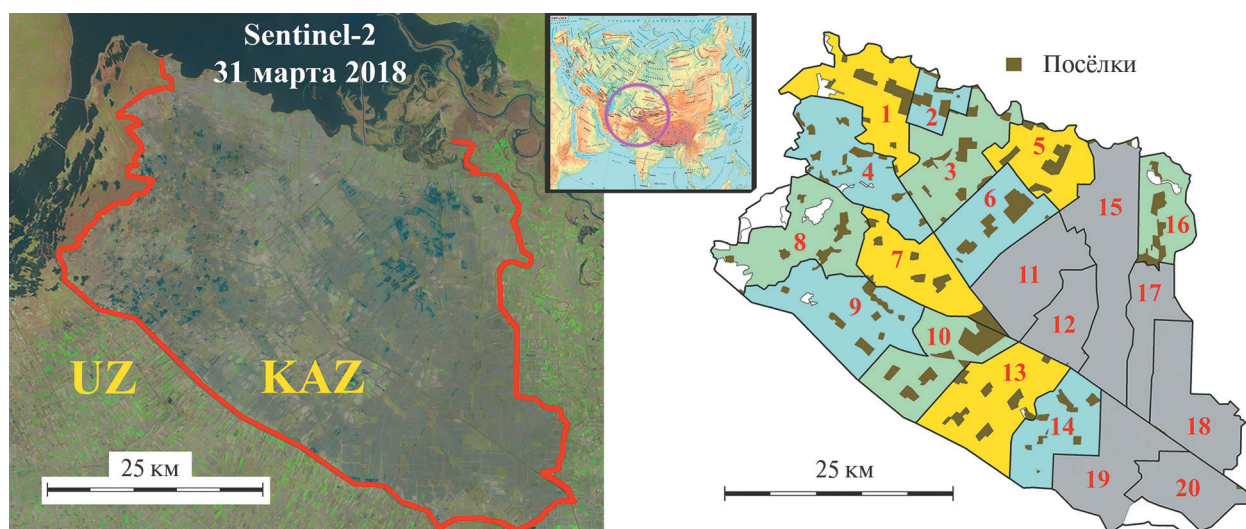


Рис. 1. Казахстанская часть массива орошения Голодной степи с выделением анализируемых сельских округов (№ 1–10, 13, 14, 16)

Средняя многолетняя (2007–2021) засоленность поливной пашни в сельских округах Мактааральского и Жетысайского районов Туркестанской обл. Казахстана по данным Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан

№	Сельский округ	Площадь поливной пашни, га	Доля незасоленной и слабозасоленной пашни, %	Доля средnezасоленной пашни, %	Доля сильно и очень сильно засоленной пашни, %	NDVI среднее периода 20 июня – 5 июля	NDSI среднее периода 25 июня – 10 июля
1	Кзылкумский	7429	66,24	26,52	7,24	0,389	0,145
2	Абай	2355	74,82	17,32	7,86	0,434	0,161
3	Ералиев	8076	73,48	21,48	5,04	0,424	0,156
4	Макталы	8210	56,29	34,01	9,7	0,349	0,123
5	Дильдабеков	5777	67,69	28,20	4,11	0,399	0,143
6	Ынтымак	7820	63,96	27,15	8,89	0,360	0,122
7	Каракай	7027	55,79	31,12	13,09	0,333	0,116
8	Атамекен	11140	64,59	25,42	9,99	0,358	0,129
9	Жылысу	11022	58,71	32,97	8,32	0,328	0,117
10	Жана Ауыл	7111	65,12	29,03	5,81	0,350	0,128
11	Кызыбек-би	7314	64,99	28,91	6,10	0,334	—
12	Калыбеков		—				
13	Достык	11283	63,83	26,14	10,03	0,362	0,132
14	Нурлыбаев	6621	51,52	39,38	9,10	0,308	0,110
15	Мактарал	11390	76,89	17,27	5,84		
16	Жамбыл	4873	75,3	12,53	12,17	0,408	0,147
17	Бирлик	4549	69,69	20,98	9,33	—	
18	Иржар	7409	82,44	13,40	4,16		
19	Жана-жол	7141	48,55	38,42	13,03		
20	Енбекши	5736	34,71	46,13	19,16		

Исходные данные

В работе использовался спутниковый продукт MCD43A4 V6 — 16-дневный композит данных MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутники Terra и Aqua) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd43a4v006/>) с суточным обновлением, представляющий собой физические коэффициенты отражения 1–7-го каналов радиометра MODIS (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>) для покрытия “land”, т.е. очищенные от влияния облачности. В данном исследовании на основе MCD43A4 формировались наборы покрытий двумя стандартными спутниковыми индексами, которые использовались для характеристики состояния поливной пашни в Казахском секторе массива орошения Голодной степи. Первый — это NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), рассчитываемый согласно стандартной формуле $NDVI = (B01 - B02) / (B01 + B02)$, где B01 — канал 1 (620–670 нм), B02 — канал 2 (841–876 нм). Второй — NDSI (*англ.* Normalized Difference Salinity Index — нормализованный разностный индекс засоления): $NDSI = (B06 - B07) / (B06 + B07)$, где B06 — канал 6 (1628–1652 нм), B07 — канал 7 (2105–2155 нм) (Al-Khaier, 2003).

В качестве наземных данных использовалась официальная статистическая информация о засоленности сельских округов от Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан (МСХ РК). Подобные оценки раз в три-пять лет делаются для каждого сельского округа на основе наземных изысканий специализированных государственных предприятий. Для Мактааральского и Жетысайского районов Туркестанской обл. Казахстана эти оценки даёт РГУ «Южно-Казахстанская гидрогеолого-мелиоративная экспедиция» МСХ РК. Засоленность пашни оценивается по состоянию на межсезонье (на 1 января). Информация периода 2007–2021 гг. использовалась для калибровки спутниковых данных.

Для визуального представления области исследования использовалась сцена Sentinel-2, взятая с портала glovis.usgs.gov.

Методика обработки данных

Обработка продукта MCD43A4 V6 проводилась в системе Google Earth Engine. Для территории Казахской части массива орошения Голодной степи формировались ряды покрытий — средних многолетних (2001–2021) значений NDVI и NDSI в различные календарные даты. Каждое покрытие представляло собой средние многолетние максимумы 15-дневного временного окна. Максимальные значения использовались для дополнительного удаления влияния облачности. Передние границы временных окон перекрывали период с 15 мая по 25 июля для NDVI и с 15 апреля по 25 июля для NDSI с шагом сдвига в 5 дней.

Выбор периода мониторинга определялся задачей поиска оптимальных календарных дат, когда связи между уровнем засоления пашни и спектральными характеристиками подстилающей поверхности наиболее выражены. Критерием корректности выбора периода мониторинга может выступать снижение показателей коррелированности между спутниковыми индексами и степенью засоления на границах выбранного временного периода мониторинга.

Состояние пашни в анализируемом регионе в течение сезона закономерно изменяется. В начале весны это переувлажнённая открытая почва с остатками водных зеркал как следствие зимне-весенней операции влагозарядки и промывки полей от вторичного засоления. Затем идёт развитие вегетации, в основном сельскохозяйственной, в зависимости от возделываемых культур, агротехники, доступности поливной воды и других факторов. Период 1–15 мая — это примерный срок повсеместного начала формирования растительного покрова на сельскохозяйственных полях региона. Ранее значения NDVI, отображающие открытую почву с различной степенью увлажнения, могут быть слишком малы и неинформативны для поставленной задачи. До 15 апреля на пашне в отдельные годы может присутствовать слишком большое количество остатков водных зеркал, что способно исказить значения NDSI. Конец июля — это период сезонного максимума зелёной биомассы на полях. Состояние подстилающей поверхности в это время в большей степени зависит от вида возделываемой

культуры, чем от других параметров. Позже, в августе, идёт процесс созревания культур (пожелтение зелёной биомассы), темпы которого в основном определяются видом культуры, что мало связано с засолением почв.

Таким образом, многолетняя динамика спектральных характеристик поливной пашни описывалась 15 сценами NDVI периода 15 мая – 25 июля и 21 сценой NDSI периода 15 апреля – 25 июля. Полученные спутниковые покрытия совмещались с векторными границами сельскохозяйственных территорий, затем регистрировались и анализировались средние по контурам значения спутниковых индексов. Территории посёлков и необрабатываемых земель (брошенных полей) при этом исключались из рассмотрения.

Для 13 предварительно отобранных сельских округов проводилось сопоставление между суммарными величинами средней многолетней доли незасоленной и малозасоленной пашни (данные МСХ РК) и средними в контурах сельского округа значениями NDVI и NDSI. Согласно официальной статистике, незасоленная и малозасоленная пашня доминирует в сельских округах анализируемого региона, варьируясь от 34,7 % (с/о Енбекши) до 82,4 % (с/о Иржар) (см. таблицу). Поэтому доля слабозасоленной пашни может выступать в роли наиболее устойчивой средней характеристики засоления пашни сельскохозяйственной территории. Коэффициент корреляции Пирсона служил параметром, количественно характеризующим степень коррелированности между средней многолетней засоленностью пашни сельского округа и значениями спутниковых индексов, а также для оценки коррелированности между самими индексами (NDVI и NDSI). В анализе использовалась довольно ограниченная выборка с числом степеней свободы равным 13, поэтому за ориентир значимости принимались величины коэффициентов корреляции Пирсона более 0,5.

Полученные результаты

Степень коррелированности между засоленностью поливной пашни в 13 сельских округах и соответствующими средними значениями спутниковых индексов (NDVI и NDSI) в период 15 апреля – 25 июля представлены на *рис. 2*. На *рис. 3* (см. с. 174) показана коррелированность между NDVI и NDSI для рассмотренных сельских округов в наиболее информативные (по связи с засолением) периоды.

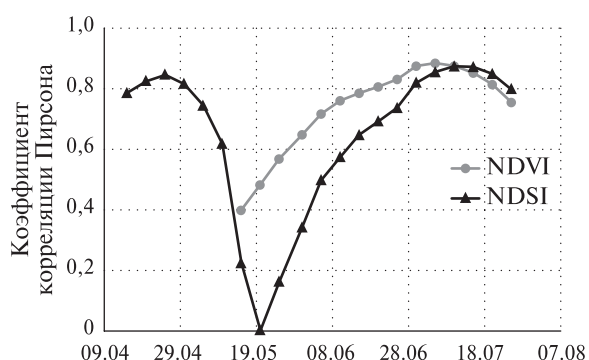


Рис. 2. Анализ средних многолетних данных (2001–2021). Коррелированность между значениями спутниковых индексов NDVI и NDSI и суммарными долями незасоленной и слабозасоленной пашни на 1 января по 13 сельским округам тестового региона в период с 15 апреля по 25 июля

Обсуждение

Связь между спектральными характеристиками подстилающей поверхности и засоленностью поливной пашни в подавляющем большинстве случаев косвенная. Соли, присутствующие в почве, — это всего лишь один из факторов, влияющих на спектральные характеристики. Существует ряд других параметров, играющих значительно более важную роль, например: вид сельскохозяйственной культуры и фаза её развития; объём зелёной биомассы, её архитектура; число поливов за сезон и нормы полива; тип полива (бороздковый, дождевание, капельный); агротехника возделывания; применение удобрений; фитосанитарное состояние культуры и пр.

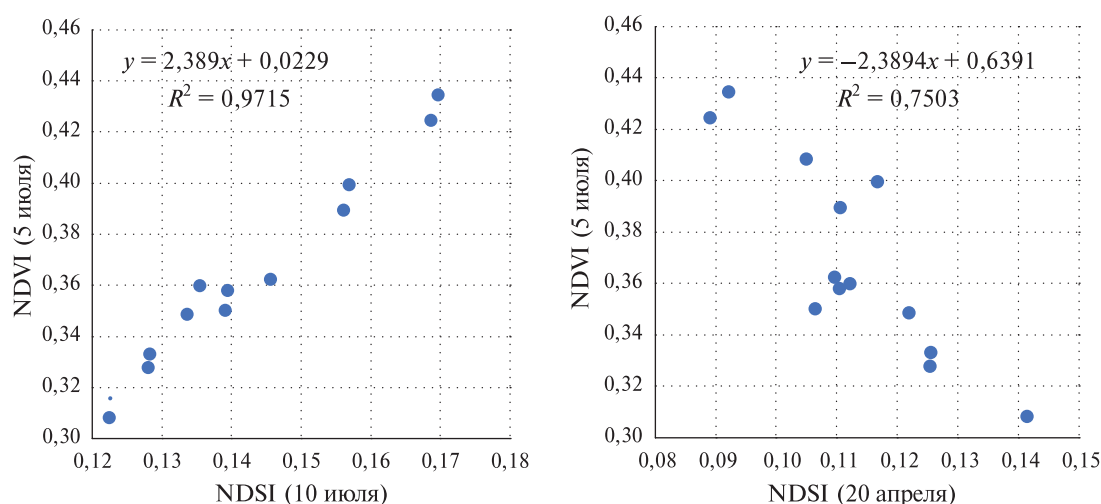


Рис. 3. Взаимосвязь между значениями NDSI и NDVI по 13 сельским округам тестового региона для периодов максимальной коррелированности между спутниковыми индексами и засоленностью поливной пашни

Для того чтобы количественно определять уровень засоленности почв на масштабе отдельных полей, необходимо учитывать вклад всех вышеперечисленных факторов. Сложность в решении подобных задач сильно ограничивает число возможных подходов к дистанционной оценке засоленности поливной пашни на масштабе отдельных полей.

В настоящем исследовании в качестве информационной основы использовались средние многолетние спутниковые данные среднего разрешения MODIS (2001–2021). Относительно низкое пространственное разрешение (от 250 м) не позволяет анализировать отдельные поля, типичный размер которых в рассматриваемом регионе составляет 1–5 га. Однако многолетний подход нивелирует значимость севооборотов, и ежегодный контроль над типом сезонного землепользования отдельного поля становится неактуальным.

Вторичное засоление поливной пашни контролируется двумя режимами. Первый связан с видом возделываемой культуры, нормами полива и в значительной мере с севооборотами. Второй имеет регулярный и пространственно-ориентированный характер. В основном это связано с эффективностью работы дренажной системы, расположением пашни в локальных понижениях или возвышенностях и другими объективными факторами, которые систематически влияют на глубину и засоленность грунтовых вод и, соответственно, на интенсивность вторичного засоления в многолетнем аспекте.

Вторичное засоление весьма динамично в течение сезона (Rukhovich et al., 2010). К концу сезона на многих полях на поверхность выносятся значительное количество соли, что вынуждает ежегодно проводить масштабные процедуры зимне-весенней (январь – апрель) промывки полей (Li et al., 2020). Попутно эти процедуры выполняют роль весенней влагозарядки. Вариации в уровнях вторичного засоления, вызываемые нормами полива и контролируемые севооборотами, нивелируются при анализе средних многолетних данных. Наоборот, регулярные пространственно-фиксированные процессы вторичного засоления поливной пашни аккумулируются в многолетних данных.

Малый размер полей (1–5 га) и типичная мозаичная контрастность спектральных характеристик массивов поливной пашни крайне затрудняют осуществление калибровки спутниковых данных MODIS с пространственным разрешением от 250 м по данным точечных наземных обследований. В настоящем исследовании наземная калибровка многолетних (2001–2021) спутниковых данных осуществлялась на основе официальной многолетней статистики о засоленности сельскохозяйственных территорий, т.е. контуров поливной пашни площадью в 4–11 тыс. га.

Суточное обновление спутниковых продуктов MODIS позволяет детально анализировать весь сезон и определять наиболее информативные календарные даты съёмки. Проведённые

исследования показали, что наиболее тесную корреляционную связь с многолетней засоленностью поливной пашни региона имеет средний многолетний максимум NDVI периода 20 июня – 5 июля (коэффициент корреляции Пирсона $R^2 = 0,88$), а также средние многолетние максимумы NDSI периода 25 июня – 10 июля ($R^2 = 0,87$) и 10–25 апреля ($R^2 = 0,85$) (см. рис. 2). Сравнивая взаимосвязи величин индексов NDVI и NDSI по сельским округам между собой, можно отметить очень высокую коррелированность летних значений ($R^2 = 0,97$) и несколько худшую ситуацию между летним NDVI и весенним NDSI ($R^2 = 0,75$) (см. рис. 3).

Фактором, связывающим спектральные особенности поливной пашни в ключевые периоды (25 апреля и 5–10 июля) с её засоленностью, по всей видимости, представляется процедура зимне-весенней промывки полей от солей. Слой воды, длительное время существующий на полях в январе – марте и необходимый для растворения и удаления солей из корнеобитаемого слоя почвы в грунтовые воды, изменяет спектральные характеристики подстилающей поверхности в апреле (переувлажнение почвы), а также смещает даты сева и темпы развития культуры на более поздние сроки, что регистрируется в начале июля индексами NDVI и NDSI.

Таким образом, физической основой регистрации засоления пашни выступает не изменение спектральных характеристик подстилающей поверхности из-за присутствия соли, а последствия ранее проведённой процедуры зимне-весенней промывки засоленных полей. Другими словами, предлагаемая методика оценки засоленности поливной пашни опирается на анализ последствий антропогенной деятельности по удалению вторичного засоления. При этом на момент спутниковой съёмки 25 апреля и 5–10 июля фактическое засоление полей может быть незначительным либо отсутствовать вовсе.

Наиболее практически востребованными целями картирования многолетнего засоления представляется выделение зон, систематически испытывающих негативное влияние от вторичного засоления, что в первую очередь связано с недостатками работы дренажной системы. Соответственно, появляются объективные, научно-обоснованные источники информации, полезные для планирования работ по восстановлению дренажной системы рассматриваемого массива орошения.

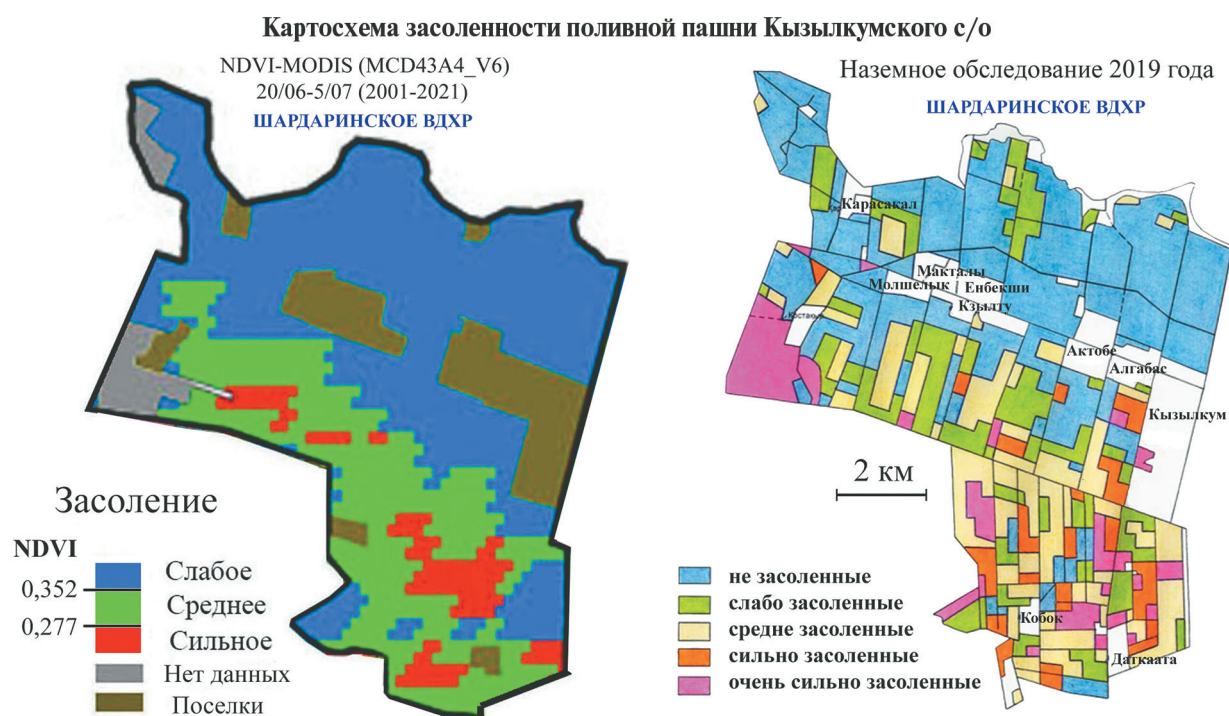


Рис. 4. Сравнение спутниковой и наземной картосхем засоленности пашни Кызылкумского сельского округа Туркестанской обл. Казахстана. Средняя многолетняя засоленность (спутниковые оценки) против результатов наземных обследований 2019 г. (данные МСХ РК)

Тестирование применимости принципов картирования многолетнего вторичного засоления

Уровень вторичного засоления поливной пашни в отдельные годы может варьироваться в зависимости от множества различных факторов, среди которых наиболее важные — это уровень засоленности и глубина грунтовых вод. Водность сезона, тип возделываемых культур (особенно аквакультур), системы и нормы полива — всё это важно, и поэтому сопоставление сезонной карты засоленности пашни, например построенной на основе данных наземного обследования, и спутниковых оценок многолетней засоленности могут иметь существенные расхождения. Наиболее близкое соответствие между этими оценками можно ожидать для территорий, имеющих регулярные градиенты уровня вторичного засоления, обусловленные внешними причинами, например наличием близкорасположенного крупного пресного водоёма, который опресняет грунтовые воды. Такие условия существуют в Кызылкупском сельском округе, расположенном на берегу Шардаринского вдхр. Сравнение наземных (на 2019 г.) и спутниковых оценок пространственного распределения пахотных земель по уровню засоления представлено на *рис. 4* (см. с. 175).

Заключение

Спутниковые индексы NDVI и NDSI поливной пашни, построенные на базе продукта MODIS MCD43A4, имеют высокую коррелированность с уровнем вторичного засоления и поэтому могут эффективно использоваться в качестве основы для дистанционного картирования среднего многолетнего уровня засоления поливной пашни в Казахском секторе массива орошения Голодной степи. Ранжирование территории массива орошения по активности вторичного засоления представляет практический интерес и может быть использовано для оптимизации сельскохозяйственной активности и планирования мероприятий по улучшению дренажной системы.

Работа выполнена при поддержке программно-целевого финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проект № BR10965172.

Литература

1. Мамедов Э.А. Изучение засоленных земель и солончаков с помощью космических методов // Исслед. Земли из космоса. 1985. № 1. С. 60–61.
2. 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.
3. 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.
4. 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 территорий в результате их 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.
5. Abbas A., Khan S., Hussain N., Hanjra M., Akbar S. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach // Physics Chemistry of the Earth. 2013. V. 55–57. P. 43–52. DOI: 10.1016/j.pce.2010.12.004.
6. Adejumbi M.A., Alonge T.A., Ojo O.I. A review of the techniques for monitoring soil salinity in irrigated fields // Advanced Multidisciplinary Research J. 2016. V. 2. No. 3. P. 167–170. DOI: 10.1080/01431168908903849.
7. Alexakis D.D., Daliakopoulos I.N., Panagea I.S., Tsanis I.K. Assessing soil salinity using WorldView-2 multispectral images in Timpaki, Crete, Greece // Geocarto Intern. 2018. V. 33. No. 4. P. 321–338. DOI: 10.1080/10106049.2016.1250826.

8. *Al-Khaier F.* Soil salinity detection using satellite Remote Sensing: Master thesis / Intern. Inst. Geo-information Science and Earth Observation. Enschede, Netherlands, 2003. 61 p.
9. *Allbed A., Kumar L., Aldakheel Y. Y.* Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: applications in a date palm dominated region // *Geoderma*. 2014. V. 230–231. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.03.025.
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. *Fan X., Weng Y., Tao J.* Towards decadal soil salinity mapping using Landsat time series data // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016. V. 52. P. 32–41. DOI: 10.1016/j.jag.2016.05.009.
12. *Laishkanov 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.
13. *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. No. 18. Art. No. 7573. DOI: 10.3390/su12187573.
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. *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 // *J. Environmental Quality*. 2010. V. 39. Iss. 1. P. 35–41. DOI: 10.2134/jeq2009.0140.
16. *Metternicht G. I., Zinck J. A.* Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 85. Iss. 1. P. 1–20. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00188-8.
17. *Rahmati M., Hamzehpour N.* Quantitative remote sensing of soil electrical conductivity using ETM+ and ground measured data // *Intern. J. Remote Sensing*. 2017. V. 38. P. 123–140. DOI: 10.1080/01431161.2016.1259681.
18. *Ramos T. B., Castanheira N., Oliveira A. R., Paz A. M., Darouich H., Simionesei L., Farzamian M., Gonçalves M. C.* Soil salinity assessment using vegetation indices derived from Sentinel-2 multispectral data. application to Lezíria Grande, Portugal // *Agricultural Water Management*. 2020. V. 241. Art. No. 106387. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106387.
19. *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.
20. *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.
21. *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.
22. *Terekhov A., Abayev N.* Irrigation cooling effect: opportunities in task of estimation of international irrigation water usage in transboundary River Syrdarya basin, Central Asia // *E3S Web Conf*. 2020. V. 23. Art. No. 02009. DOI: 10.1051/e3sconf/202022302009.
23. *Whitney K., Scudiero E., El-Askary H. M., Skaggs T. H., Allali M., Corwin D. L.* Validating the use of MODIS time series for salinity assessment over agricultural soils in California, USA // *Ecological Indicators*. 2018. V. 93. P. 889–898. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.05.069.
24. *Zare S., Shamsi S., Fallah R., Abtahi S. A.* Weakly-coupled geo-statistical mapping of soil salinity to Stepwise Multiple Linear Regression of MODIS spectral image products // *J. African Earth Sciences*. 2019. V. 152. P. 101–114. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.01.008.
25. *Zhang T., Qi J., Gao Yu, Ouyang Z., Zeng S., Zhao B.* Detecting soil salinity with MODIS time series VI data // *Ecological Indicators*. 2015. V. 52. P. 480–489. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.01.004.

Regional-scale assessment of multi-year soil salinity using MODIS in the Syr Darya River valley, Kazakhstan

A. G. Terekhov¹, G. N. Sagatdinova¹, B. A. Murzabaev²

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

² M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent 160012, Kazakhstan
E-mail: bolat101955@mail.ru

In the Syr Darya River valley there is a large irrigated region — the Hungry Steppe with a total area of about 10 thousand km². The lower part of this region, which is about 140 thousand hectares of irrigated arable land, belongs to the territory of Kazakhstan. After the collapse of the USSR, hydroelectric power plants in the upper reaches of the river basin changed their operating modes from irrigation to energy. In addition, the regional drainage system has partially lost its functionality. All this contributed to the activation of the secondary soil salinity processes. In this study, two satellite indices, normalized differential vegetation and salinity indexes (NDVI and NDSI) based on the MODIS MCD43A4 product of the period April–July 2001–2021, were tested as a basis for regional mapping of many-year soil salinity in the Kazakhstan's Syr Darya River valley. Official state information on the soil salinity of rural districts (district — an administrative unit with an area of irrigated arable land of 4–11 thousand hectares) of the Maktaaral and Zhetysai Regions of the Turkestan Oblast of Kazakhstan in the period 2007–2021 was used to calibrate satellite data. It was found that the best correlation with the long-term salinity of irrigated arable land has the average long-term maximum NDVI of the period June 20–July 5 (Pearson correlation coefficient $R^2 = 0.88$), as well as the average long-term maximum NDSI of the periods April 10–25 ($R^2 = 0.85$) and June 26–July 10 ($R^2 = 0.87$). Also, a close correlation between the considered indices with a Pearson correlation coefficient up to 0.97 is recorded. The physical basis linking satellite data with secondary soil salinization, apparently, is the procedure of winter-spring irrigation, which, in the process of removing salts, leads to spring soil waterlogging and delays in the early summer development of agricultural vegetation. Thus, the average long-term values of the NDVI and NDSI satellite indexes built on the MODIS MCD43A4, on certain calendar dates, can serve as the basis for regional mapping of the average long-term soil salinity in the test site region. One of the important purposes of the many years soil salinity mapping may be to identify areas that are systematically subjected to secondary soil salinization.

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

Accepted: 27.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-169-179

References

1. 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).
2. Pankova E. I., Mazikov V. M., Isaev V. A., Yamnova 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).
3. 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.
4. 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.
5. Abbas A., Khan S., Hussain N., Hanjra M., Akbar S., Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach, *Physics Chemistry of the Earth*, 2013, Vol. 55–57, pp. 43–52, DOI: 10.1016/j.pce.2010.12.004.
6. Adejumo M. A., Alonge T. A., Ojo O. I., A review of the techniques for monitoring soil salinity in irrigated fields, *Advanced Multidisciplinary Research J.*, 2016, Vol. 2, No. 3, pp. 167–170, DOI: 10.1080/01431168908903849.

7. Alexakis D. D., Daliakopoulos I. N., Panagea I. S., Tsanis I. K., Assessing soil salinity using WorldView-2 multispectral images in Timpaki, Crete, Greece, *Geocarto Intern.*, 2018, Vol. 33, No. 4, pp. 321–338, DOI: 10.1080/10106049.2016.1250826.
8. Al-Khaier F., *Soil salinity detection using satellite Remote Sensing: Master thesis*, Intern. Inst. Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, Netherlands, 2003, 61 p.
9. Allbed A., Kumar L., Aldakheel Y., Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: applications in a date palm dominated region, *Geoderma*, 2014, Vol. 230–231, pp. 1–8, DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.03.025.
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. Fan X., Weng Y., Tao J., Towards decadal soil salinity mapping using Landsat time series data, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, Vol. 52, pp. 32–41, DOI: 10.1016/j.jag.2016.05.009.
12. 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, Vol. 25, pp. 2469–2475, DOI: 10.15244/pjoes/61629.
13. 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, No. 18, Art. No. 7573, DOI: 10.3390/su12187573.
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. 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, *J. Environmental Quality*, 2010, Vol. 39, Issue 1, pp. 35–41, DOI: 10.2134/jeq2009.0140.
16. Metternicht G. I., Zinck J. A., Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 85, Issue 1, pp. 1–20, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00188-8.
17. Rahmati M., Hamzehpour N., Quantitative remote sensing of soil electrical conductivity using ETM+ and ground measured data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2017, Vol. 38, pp. 123–140, DOI: 10.1080/01431161.2016.1259681.
18. Ramos T. B., Castanheira N., Oliveira A. R., Paz A. M., Darouich H., Simionesei L., Farzamian M., Gonçalves M. C., Soil salinity assessment using vegetation indices derived from Sentinel-2 multispectral data. application to Lezíria Grande, Portugal, *Agricultural Water Management*, 2020, Vol. 241, Art. No. 106387, DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106387.
19. 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.
20. 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.
21. Singh A. N., Dwivedi R. S., Delineation of salt-affected soils through digital analysis of Landsat MSS data, *Intern. J. Remote Sensing*, 1989, Vol. 10, No. 1, pp. 83–92, DOI: 10.1080/01431168908903849.
22. Terekhov A. G., Abayev N. N., Irrigation cooling effect: opportunities in task of estimation of international irrigation water usage in transboundary River Syrdarya basin, Central Asia, *E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 223, Art. No. 02009, DOI: 10.1051/e3sconf/202022302009.
23. Whitney K., Scudiero E., El-Askary H. M., Skaggs T. H., Allali M., Corwin D. L., Validating the use of MODIS time series for salinity assessment over agricultural soils in California, USA, *Ecological Indicators*, 2018, Vol. 93, pp. 889–898, DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.05.069.
24. Zare S., Shamsi S., Fallah R., Abtahi S. A., Weakly-coupled geo-statistical mapping of soil salinity to Stepwise Multiple Linear Regression of MODIS spectral image products, *J. African Earth Sciences*, 2019, Vol. 152, pp. 101–114, DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.01.008.
25. Zhang T., Qi J., Gao Yu, Ouyang Z., Zeng S., Zhao B., Detecting soil salinity with MODIS time series VI data, *Ecological Indicators*, 2015, Vol. 52, pp. 480–489, DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.01.004.