

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.471

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЗАСОЛЕНИЯ ОРОШАЕМЫХ ПОЧВ ЮЖНОГО КАЗАХСТАНА

© 2023 г. И. Ю. Савин^{a, b, *} (ORCID: 0000-0002-8739-5441), А. Г. Терехов^c,
Е. Н. Амиргалиев^c, Г. Н. Сагатдинова^c

^aПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

^bИнститут экологии РУДН, Подольское ш., 8, стр. 5, Москва, 115093 Россия

^cИнститут информационных и вычислительных технологий, ул. Шевченко, 28, Алматы, 050010 Казахстан

*e-mail: savin_iyu@esoil.ru

Поступила в редакцию 20.03.2023 г.

После доработки 06.04.2023 г.

Принята к публикации 24.05.2023 г.

Приведены результаты апробации новых подходов к мониторингу засоленности почв орошаемых массивов, основанные на косвенном детектировании засоленности почв с использованием многолетних архивов спутниковых данных. Исследования выполнены на примере орошаемых земель Мактааральского района Туркестанской области Республики Казахстан. В качестве индикатора уровня засоленности почв используется частота и сроки промывок почв от солей, которые выявляются на основе многолетних архивов спутниковых данных Sentinel-1,2 и Landsat-8 (с 2016 по 2022 гг.). Информация о частоте промывок почв от солей и о годе последней промывки позволила ранжировать поля по степени засоленности почв. Сравнение полученной информации с мелкомасштабной почвенной картой и со статистическими данными, основанными на полевых обследованиях полей, показало хороший уровень сходства уровня засоленности почв тестового региона. Подобный подход может быть использован для других регионов с орошаемыми почвами, подверженными вторичному засолению, где практикуются зимние промывки затоплением. Он не требует дополнительной адаптации и основан на простых алгоритмах распознавания по спутниковым данным водной поверхности.

Ключевые слова: промывка солей, Sentinel-2, Landsat, засоленные почвы, NDVI

DOI: 10.31857/S0032180X23600543, **EDN:** UKEJYA

ВВЕДЕНИЕ

Вторичное засоление является одним из наиболее распространенных типов деградации почв в мире. Основной причиной их распространения является нерациональное использование земель в орошаемом земледелии при наличии засоленных почвообразующих пород или близко залегающих к поверхности засоленных грунтовых вод [21].

Согласно оценке ФАО, вторичное засоление почв проявляется почти на 40% орошаемых земель мира [19, 23]. Оно распространено практически во всех странах. Например, в Европе оно отмечается на 1–3 млн га [27], в России в среднем вторичному засолению подвержено около 25% орошаемых земель [28].

В Казахстане засоленные почвы занимают около 40% площади страны [6]. По данным Отарова с соавт. [25], в Южном Казахстане 43 тыс. га орошаемых почв вторично засолено из-за полива засоленными водами и около 80 тыс. га — из-за подъема засоленных грунтовых вод.

Распространение вторичного засоления почв приводит к значительным потерям урожайности сельскохозяйственных культур, часто к полному выводу засоленных земель из активного оборота. По данным Варгас с соавт. [7], из-за засоления почв в мире ежегодно теряется от 18 до 43% урожая сельскохозяйственных культур.

Для предотвращения распространения вторичного засоления почв необходим постоянный мониторинг орошаемых земель. Специфика засоления почв такова, что оно может проявляться быстро и сильно изменяется в сезонном и многолетнем циклах [1]. Традиционно мониторинг засоления почв осуществляется путем полевых обследований полей с отбором почвенных образцов с их последующим лабораторным анализом [7]. Данные работы очень трудоемки, высокозатратны и требуют много времени, что предопределяет их низкую эффективность.

На протяжении многих лет делаются попытки создания методов мониторинга засоления почв, основанных на использовании спутниковых дан-

ных. Авторы используют разнообразные спутниковые данные, а также разные алгоритмы детектирования засоленных почв. Подробные обзоры существующих методов приведены в работах [16, 17, 23, 30, 32].

Наиболее распространены подходы, базирующиеся на детектировании засоления почв по характеру изображения их открытой поверхности [15, 30, 31] или на анализе изображения растительности, как индикаторе степени засоления почв и глубины залегания солевого горизонта [11, 17, 20, 24]. При детектировании засоления почв по характеру изображения на спутниковых данных их открытой поверхности удастся успешно детектировать засоленность лишь поверхностного горизонта почв, а при анализе изображения растительности возникает проблема выбора оптимального времени получения изображений, при котором засоление почв в наибольшей степени сказывается на состоянии растительности. И в этом случае остается сложно решаемой задача оценки слоя засоления почв, который влияет на состояние растительности и на ее изображение на спутниковых данных. Кроме того, большая часть предлагаемых алгоритмов анализа спутниковых данных хорошо работает лишь локально, а попытки переноса их на другую территорию приводят к негативным результатам.

Сложность мониторинга засоления орошаемых почв также предопределяется его высокой динамичностью. В связи с этим результаты детектирования засоленности почв при их успешном детектировании по спутниковым данным будут отражать лишь ситуацию на момент съемки, которая может быстро измениться во время сезона вегетации сельскохозяйственных культур.

Таким образом, несмотря на большое количество исследований и публикаций, единого метода спутникового мониторинга засоления почв, который учитывал бы и сезонную, и межгодовую динамичность, до сих пор не создано.

В настоящей работе предложены новые подходы к мониторингу засоления почв пахотных угодий, основанные на анализе частоты промывок почв от засоления по спутниковым данным, которые показали хорошую точность на территории южной части Казахстана.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на территории Мактааральского района Туркестанской области Республики Казахстан. Район является самым южным в стране (рис. 1).

Территория представляет собой полупустынные ландшафты с естественной осочково-мятликовой и мятликово-осочковой эфемероидной растительностью. На территории исследований

преобладают сероземы светлые суглинистые и легкосуглинистые, а также лугово-сероземные почвы с участием луговых солончаков. На самом севере территория ограничена долиной р. Сырдарьи с аллювиальными песчаными и супесчаными почвами.

Территория сильно освоена в сельскохозяйственном отношении. Большая часть земель — это пахотные угодья с посевами риса, пшеницы, хлопка, люцерны. Все культуры возделываются в орошаемых условиях. Оросительная вода подается и отводится по каналам. В большинстве случаев используется слабоминерализованная поливная вода [4]. По качественному составу солей поливные арычные воды можно отнести к хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатным и магниевонариевым [3]. В сочетании с тем, что почвы региона также в различной степени засолены (от незасоленных и слабозасоленных сероземов светлых до солончаков), это постепенно приводит к повышенному накоплению солей в верхней части почвы, которые периодически промываются зимними промывками. Процесс промывки заключается в том, что поверхность поля затопляется водой на определенный срок, после чего вода откачивается и сбрасывается посредством отводных каналов в Сырдарью. В зависимости от степени засоления промывку производят различными промывными нормами. При сильном и очень сильном засолении на промывку подают от 8 до 12 тыс. м³ воды/га. Этот объем воды подают за 2–3 такта по 4000 м³ воды. Это обычно делают с декабря по март. При средней степени засоления подают от 4 до 8 тыс. м³ воды/га с января по март. При незасоленной или слабозасоленной почве подобные промывки обычно не проводят, а почва промывается за счет некоторого увеличения поливных норм [9]. По мере накопления солей в почве промывки повторяют или на следующий год, или через несколько лет.

Таким образом, засоление почв на территории исследований очень динамично. На фоне естественного засоления наблюдаются процессы накопления солей в верхней части почв и их периодического удаления промывками. Кроме того, засоление почв изменяется в результате весенней влагозарядки почв. Все это приводит к тому, что естественный фон засоления почв значительно осложняется накоплением солей в процессе возделывания культур, промывками и влагозарядками, которые индивидуальны для каждого поля. Это создает пестроту засоления почв территории исследований, которая очень динамична во времени.

В основе метода детектирования засоления почв на территории исследований лежит идея, что частота промывок почв от солей может служить обобщенным индикатором их засоления.

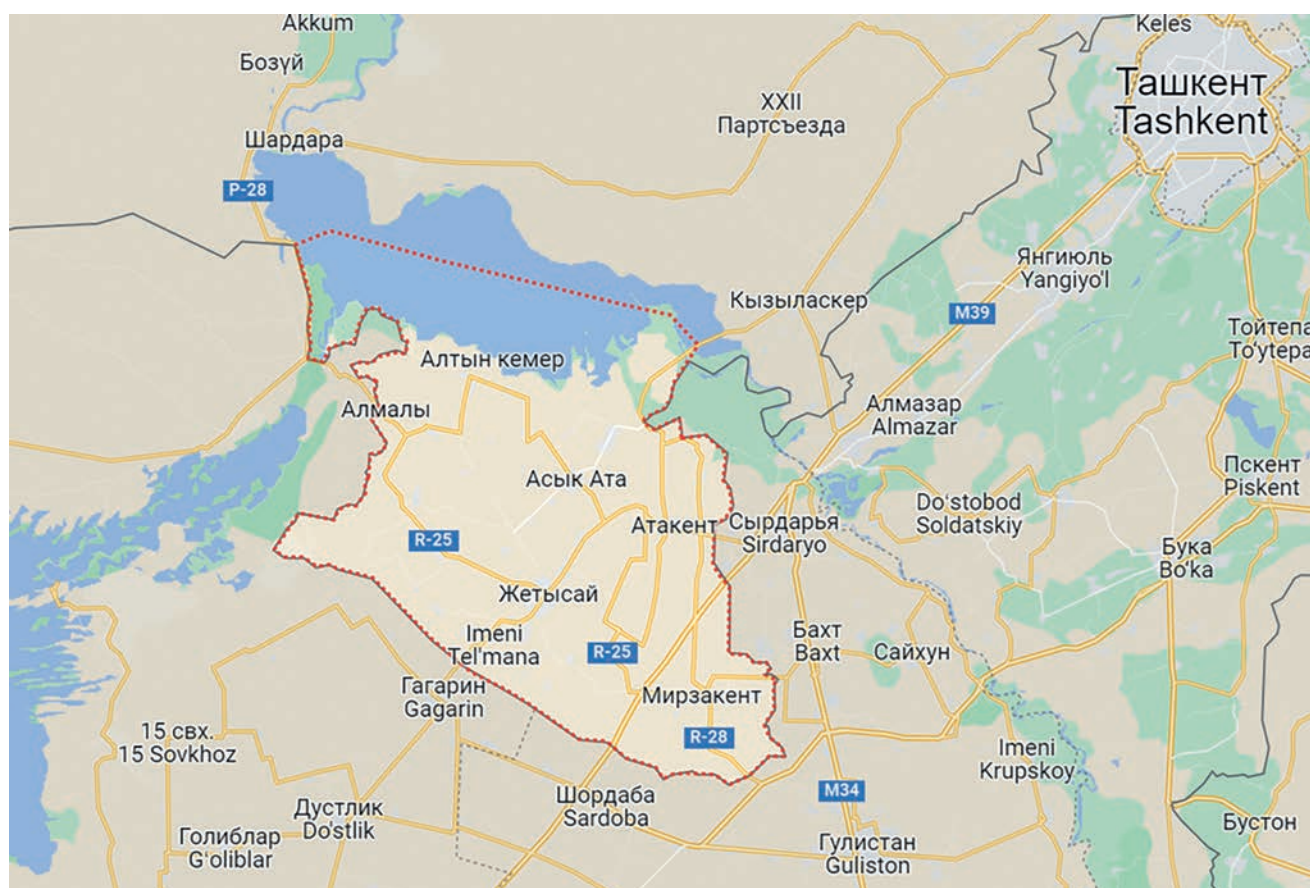


Рис. 1. Расположение территории исследований.

Эта идея базируется на том, что промывка осуществляется лишь тогда, когда в почвах накоплено такое количество солей, которое приводит к резкому снижению урожая.

Более частые промывки полей сигнализируют о том, что почвы поля быстро восстанавливают уровень засоления, критичный для возделывания культур. Более редкие промывки являются индикатором более слабого засоления почв. Их отсутствие говорит о том, что почвы не засолены или засоление настолько слабо, что не оказывает влияние на урожайность сельскохозяйственных культур.

Таким образом, анализ частоты зимних промывок почв за последние годы позволяет обобщенно оценить уровень их засоления, учитывая косвенно скорость восстановления уровня засоления после очередной промывки. Результаты подобного анализа получаются в обобщенном виде на уровне отдельных полей.

Зимние промывки на полях региона исследований выявляли с помощью автоматизированного анализа спутниковых данных. Источником спутниковой информации служили архивы Google-Earth-Engine (GEE). Использовали данные спутников Landsat-8 OLI (разрешение 30 м) и Sen-

tinel-1,2 (разрешение от 20 м) за период съемки январь—февраль 2016—2022 гг. На каждом изображении выделяли водную поверхность. Полученные за год (январь—февраль) водные маски отдельных изображений объединяли в суммарную маску водной поверхности для каждого года.

Данные обрабатывали в формате облачных вычислений в среде GEE. Методика выделения водной поверхности основана на пороговых алгоритмах. По оптическим данным спутников Landsat-8 и Sentinel-2 строили индекс NDWI (Normalized Difference Water Index) [13, 22, 26, 33], и через пороговое значение индекса, которое устанавливалось экспертно, формировали маску открытой водной поверхности. Дополнительно использовали радарные данные Sentinel-1. На базе двух поляризаций (VV и VH) создавали отдельный канал с минимальными значениями отражения в этих двух поляризациях. Затем для выделения водного зеркала применяли пороговую классификацию, с последующей фильтрацией остаточных спекл-шумов [18]. Маски открытой водной поверхности, построенные по оптическим и радарным данным, объединяли. Таким образом были получены маски открытой водной поверхности для

Таблица 1. Экспертные правила для оценки актуальной засоленности почв

Время после последней промывки, лет	Частота промывок					
	каждый год	раз в 2 года	раз в 3 года	раз в 4 года	раз в 5 лет	раз в 6–7 лет
0	Отсутствует или слабое	Отсутствует или слабое	Отсутствует или слабое	Отсутствует или слабое	Отсутствует или слабое	Отсутствует или слабое
1	—	Сильное или очень сильное	Среднее	Отсутствует или слабое	Отсутствует или слабое	Отсутствует или слабое
2	—	—	Сильное или очень сильное	Среднее	Отсутствует или слабое	Отсутствует или слабое
3	—	—	—	Сильное или очень сильное	Среднее	Отсутствует или слабое
4	—	—	—	—	Сильное или очень сильное	Среднее
5 и более	—	—	—	—	—	Сильное или очень сильное

всех анализируемых лет для периода январь–февраль. После этого полученные маски последовательно пересекали друг с другом с целью получения данных о водной поверхности в годовой динамике.

Полученную информацию анализировали с точки зрения периодичности промывок, а также количества лет, прошедших после последней промывки. Периодичность промывок использовали в качестве показателя общего уровня засоленности пахотных почв. Считалось, что чем чаще проводят промывку, тем более высок уровень общего засоления почв. Отсутствие промывок индицирует отсутствие больших проблем с вторичным засолением. В этом случае, если вторичное засоление и присутствует, то оно находится на уровне, который не приводит к большим (неприемлемым) потерям урожайности сельскохозяйственных культур. Этот подход базируется на данных Аверьянова [1] и Айдарова [2], которые установили, что солевой режим светлых сероземов Голодной степи напрямую связан с режимом влажности почвы и грунтовыми водами, так как передвижение водорастворимых солей происходит с водой.

В зависимости от частоты промывок на поле и от года последней промывки экспертно определяли уровень засоленности корнеобитаемой толщи почв. Считали, что если промывка была в текущем году, то корнеобитаемая толща почв не засолена или слабо засолена (уровень засоления почв вполне приемлем для возделывания сельскохозяйственных культур). В остальных случаях использовали экспертные правила, отраженные в табл. 1.

Полученные результаты анализа визуализировали в виде карт, обобщали для сельскохозяйственных округов территории исследований и

сравнивались с сельскохозяйственной статистикой, полученной на основе полевых обследований по заданию Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан (МСХ РК). Подобные оценки делаются для каждого сельскохозяйственного округа на основе наземных изысканий специализированных государственных предприятий (на территории исследований это «Южно-Казахстанская геолого-мелиоративная экспедиция, МСХ РК»). Засоленность пашни на каждом поле оценивается по состоянию на 1 января. В работе использовали информацию периода 2016–2021 гг. Для оценки общего уровня засоления почв применяли средние данные за период 2016–2021 гг., а для оценки актуального засоления в 2021 г. — данные обследований за 2021 г.

Формат описания степени засоления поливной пашни в полевых условиях с указанием размеров площадей включал пять классов: незасоленная; слабозасоленная; средnezасоленная; сильнозасоленная; очень сильно засоленная, что соответствует принципам описания засоления пашни по критериям ФАО [7]. В настоящей работе классы незасоленная и слабозасоленная, а также классы сильнозасоленная и очень сильно засоленная объединяли в классы незасоленная и слабозасоленная и сильно и очень сильно засоленная.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ спутниковых данных показал, что около 45% территории региона исследований вообще не подвержено промывкам, около 14% промывается только один раз в 7 лет, около 9% промывается 2 раза в 7 лет. Каждый год промывается около 4% всех орошаемых почв. Три, четыре, пять и шесть раз за 7 лет промывается по 6–8% почв. Пространственное представление этой информации в

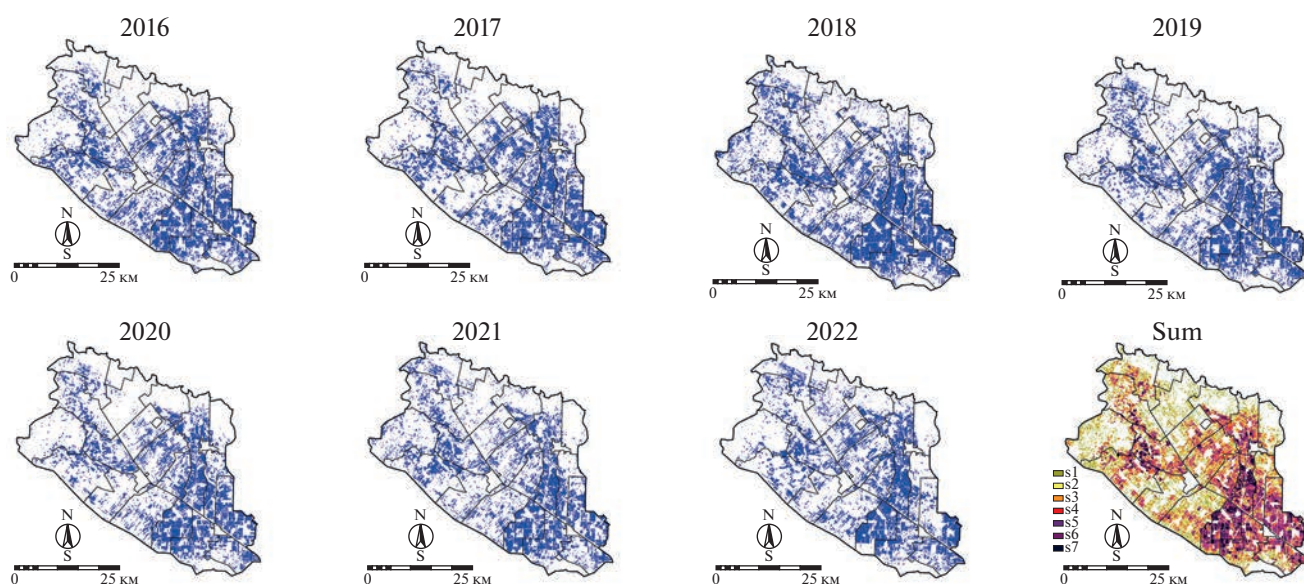


Рис. 2. Карты промывок на полях региона исследований за период 2016–2022 гг. (синий цвет — промывка, sum — среднее количество промывок в расчете на год).

виде карт приведено на рис. 2, судя по которому наиболее часто промываются почвы юго-восточной части района.

Исходя из того, что промывка почв проводится тогда, когда содержание солей в них становится неприемлемо высоким, можно считать, что промываются почвы в состоянии сильного или очень сильного засоления. После промывки содержание солей в них опускается до минимума, и они становятся незасоленными или слабозасоленными. Таким образом, частоту промывок можно использовать как индикатор степени общей засоленности почв. Следовательно, чем чаще почвы подлежат промывке, тем выше уровень их общего засоления (под “общим засолением” понимаем уровень содержания в почве солей, если их не промывать). И наоборот, если почвы редко промываются, то общее содержание солей в них низкое. Базируясь на этих рассуждениях, была построена карта общего засоления почв региона (рис. 3).

На данную схему нанесены границы почвенно-географических выделов почвенной карты Казахской ССР [12]. Видно, что почвы с наибольшим общим засолением в основном приурочены к ареалу лугово-сероземных почв в сочетании с луговыми солончаками. Почвы этого выдела на территории исследований действительно являются самыми засоленными. А среди светлых сероземов, согласно рис. 3, в целом в большей степени засолены более тяжелые по гранулометрическому составу разновидности, что логично. Данное сопоставление не является оптимальным из-за мелкого масштаба карты-сравнения. К со-

жалению, сведений о наличии почвенных карт более крупного масштаба территории исследований обнаружить не удалось.

В результате промывок общий уровень засоленности почв уменьшается на какое-то время и затем постепенно восстанавливается до следующей промывки. Таким образом, кроме общей засоленности почв, которая обычно и отражается на почвенной карте, на основе используемого подхода можно ежегодно весной строить карты актуальной засоленности с учетом частоты промывок и срока после последней промывки. На основе экспертных правил, приведенных в табл. 1, была построена карта актуальной засоленности орошаемых почв региона на весну 2021 г. (рис. 4).

Согласно построенным картам на территории исследований сильно и очень сильно засоленных орошаемых почв общей засоленности около 10%, средней засоленности около 31% и слабой засоленности около 14%. А на карте актуальной засоленности на весну 2021 г. сильно и очень сильно засоленных орошаемых почв было более 12%, средnezасоленных — около 16% и слабой засоленности — около 24%. Таким образом, актуальная засоленность орошаемых почв весной 2021 г. на территории исследований была меньше общей засоленности. Теоретически актуальная засоленность орошаемых почв на территории исследований каждый год должна быть ниже общей засоленности. Но география почв разной засоленности меняется от года к году в зависимости от истории промывок почв на полях.

Сравнение полученных данных об актуальной засоленности весной 2021 г. с данными полевых

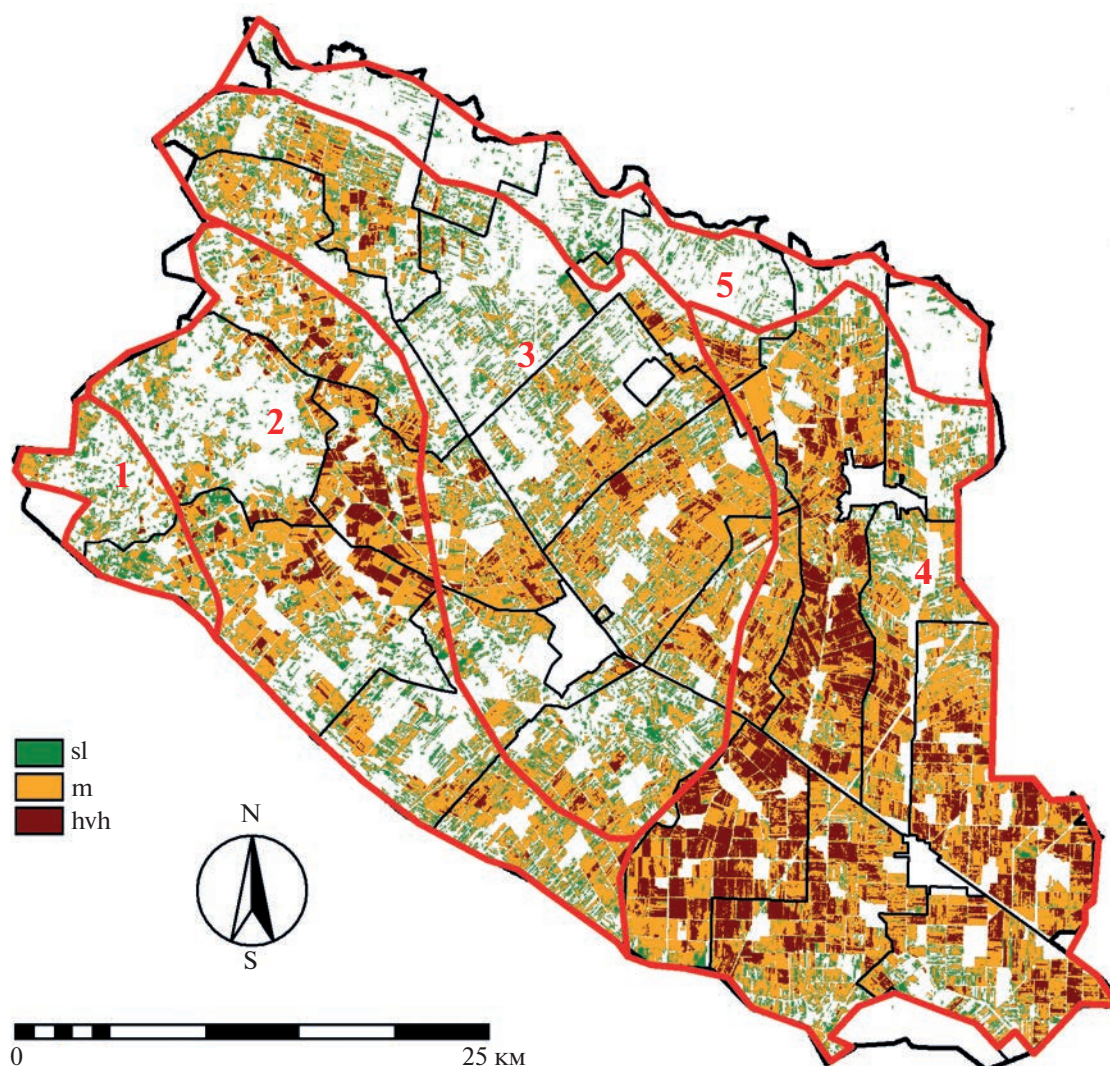


Рис. 3. Средняя многолетняя засоленность почв (sl – незасоленные и слабозасоленные, m – средnezасоленные, hvh – сильно и очень сильно засоленные, красные линии – границы выделов почвенной карты: 1 – сероземы светлые супесчаные и песчаные, 2 – сероземы светлые суглинистые, 3 – сероземы светлые легкосуглинистые, 4 – лугово-сероземные с солончаками луговыми, 5 – вода).

обследований в разрезе нескольких сельскохозяйственных округов (для которых были в наличии данные полевых обследований) приведено в табл. 2.

Видно, что разница между спутниковыми данными и результатами полевого обследования достаточно велика, хотя порядок величин вполне сопоставим. Эта разница может быть обусловлена целым рядом причин. Во-первых, результаты спутникового мониторинга получены для весеннего времени 2021 г., а конкретное время получения полевых данных неизвестно. Во-вторых, приведенные данные полевых обследований (табл. 2) характеризуют пахотный горизонт почв, в то время как результаты спутникового мониторинга относятся ко всему потенциально корнеобитаемо-

му слою почв. В-третьих, границы классов засоленности для полевых данных и спутникового анализа могут немного отличаться друг от друга. Могут быть и другие, не упомянутые выше, причины наблюдаемых расхождений.

Предложенный подход достаточно просто реализуем. Это связано с наличием в настоящее время необходимой для него спутниковой информации, которая может получаться раз в несколько дней с достаточным пространственным разрешением. Кроме того, подход базируется на детектировании по спутниковым данным водной поверхности, сигнал от которой в настоящий момент обнаруживается наиболее надежно из всех объектов наземного покрова [34].

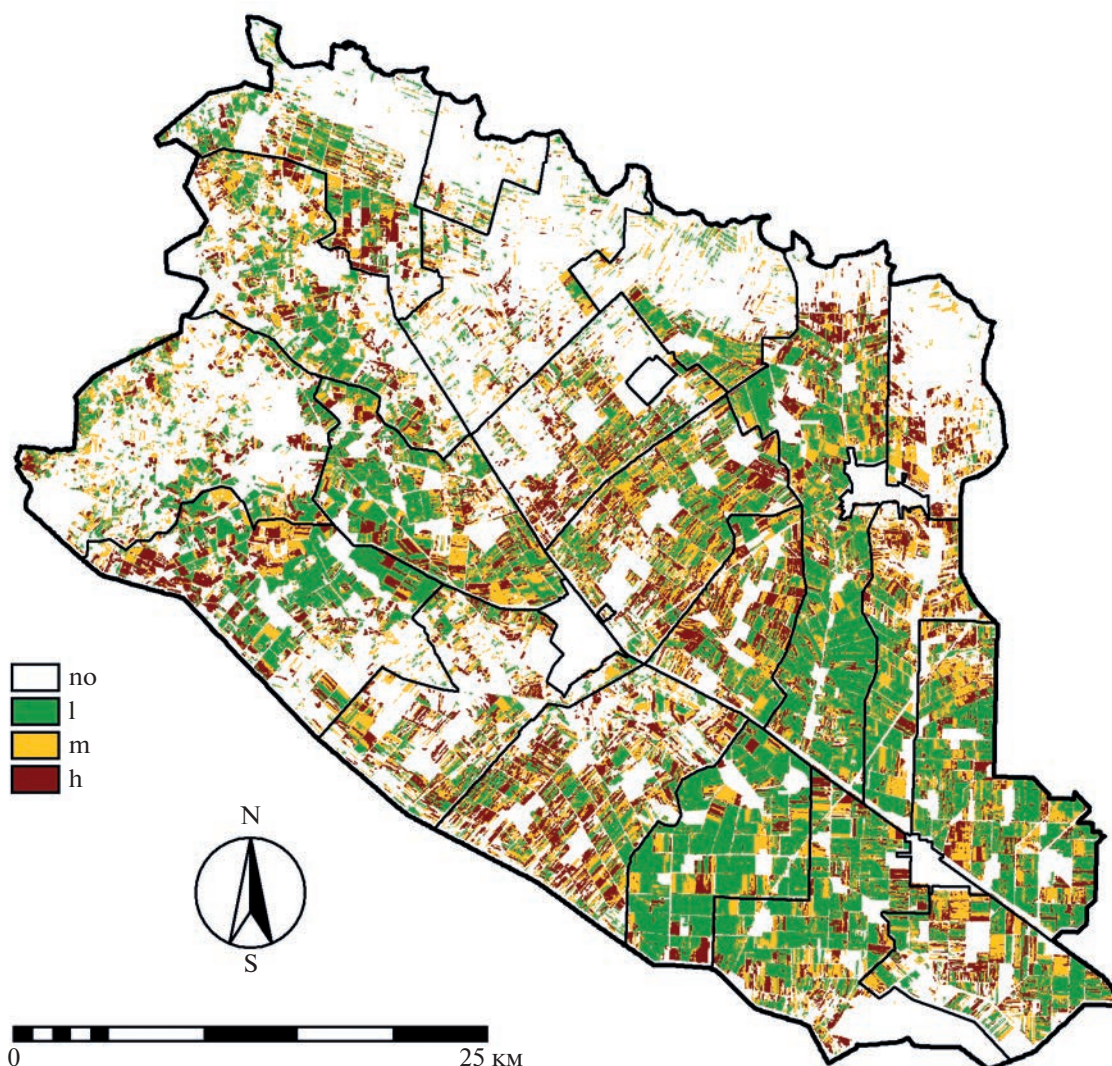


Рис. 4. Засоленность орошаемых почв весной 2021 г. (l — отсутствует или слабая, m — средняя, h — сильная и очень сильная, no — нет орошения).

От традиционных методов полевого обследования [7] подход отличается оперативностью (одновременное получение информации на большой территории), низкой затратностью (исключением полевых и аналитических работ) и воспроизводимостью (на основе одного и того же алгоритма можно анализировать изображения разных сроков съемки). Но он не может рассматриваться в качестве замены традиционных подходов. Он предназначен лишь для получения оперативной информации для большой территории, хотя и с потерей качества относительно традиционных подходов.

Методы, основанные на детектировании засоленности почв по изображению их открытой поверхности или по изображению растительности на полях, на данных многоканальной или гиперспектральной съемки также требуют проведения

полевых работ и проведение съемки в безоблачную погоду в узкие промежутки времени [11, 30].

Спецификой разработанного подхода является то, что классы засоленности почв, используемые для их оценки, во многих случаях не соответствуют общепринятым классам в терминах ФАО [7] или отечественной классификации почв по засоленности [14]. Классы по степени засоленности почв в предложенном подходе больше связаны с экологическими требованиями возделываемых культур и с их физиологией, чем с конкретным содержанием солей в том или ином горизонте почв. То есть к сильно и очень сильно засоленным почвам в данном подходе фактически отнесены почвы, на которых возделывание сельскохозяйственных культур из-за высокого уровня содержания солей в корнеобитаемом слое стало невозможным. К средnezасоленным отнесены

Таблица 2. Сравнение данных спутниковой оценки актуальной засоленности почв в 2021 г. (число в числителе) и данных полевых обследований (число в знаменателе) (разная степень округления чисел связана с разной точностью методов, использованных для их получения)

Сельскохозяйственный округ	Актуальная степень засоленности орошаемых почв, % от орошаемых почв		
	незасоленные и слабозасоленные	среднезасоленные	сильно и очень сильно засоленные
Жана Ауыл	61/56.6	28/29.9	11/13.5
Атамекен	62/80.7	20/11.8	18/7.5
Макталы	58/72.3	33/17.2	11/10.5
Казыбекби	56/57.6	33/23.3	11/19.1
Жамбыл	73/78.0	17/12.4	10/9.7
Мактарал	65/70.9	29/16.3	6/12.8

почвы, засоленность которых еще позволяет возделывать культуры, но их развитие и урожайность уже страдают от засоленности почв. К слабозасоленным отнесены почвы, уровень засоленности которых в корнеобитаемой толще практически не влияет на развитие и урожайность сельскохозяйственных культур. Этим предложенный подход отличается от других подходов, основанных на анализе спутниковых данных, в которых авторы определяют засоленность почв лишь в поверхностном горизонте почв [15, 16].

Оценка засоленности почв в предложенном подходе проводится не на анализе содержания в почвах солей или на основе картографирования почвенных выделов с использованием какой-либо классификации почв, а фактически на основе влияния засоленности почв на возможность возделывания сельскохозяйственных культур. Следовательно, критерием засоленности выступает не содержание солей в почве в абсолютных величинах и не их химический состав, а реакция на содержание солей и типа засоления в корнеобитаемой толще почв посевов сельскохозяйственных культур. Таким образом, подобный подход к мониторингу засоленности почв может быть отнесен к косвенным, при котором уровень засоленности почв оценивается по частоте промывок и времени последней промывки почв от солей, и с учетом влияния засоленности почв на состояние посевов. Методы косвенного картографирования почв давно широко используются при дешифрировании почв по характеру изображения растительного покрова на данных дистанционного зондирования [5, 8]. В последнее время появляются подобные исследования и для пахотных угодий с культурной растительностью [10, 28]. Но в нашем случае растительность на полях не анализируется. Учитывается лишь частота промывок в качестве косвенного индикатора общего уровня засоленности почв, а также год последней промывки как косвенный показатель актуальной засоленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен методический подход, который позволяет косвенно по многолетним архивам спутниковых данных оценивать степень засоленности орошаемых почв на территории исследований. Подход базируется на анализе многолетней частоты промывок орошаемых полей и годе последней промывки, которые детектируются по присутствию открытой водной поверхности на полях в зимний период года.

Апробация подхода на примере Мактааральского района Туркестанской области Казахстана показала хорошее сходство результатов оценки засоленности, полученных на основе анализа предложенного подхода и результатов полевых обследований.

Получаемые на основе предложенного подхода карты засоленности почв в целом коррелируют с почвенно-картографическими выделами традиционной составленной мелкомасштабной почвенной карты, несмотря на ее сильную генерализованность. Существующие отличия связаны в основном с тем, что градации засоленности почв в предложенном подходе отличаются от градаций засоленности почв в рамках общепринятых классификаций засоленности почв или градаций засоленности почв ФАО.

Несмотря на это, предложенный подход позволяет осуществлять оперативный и низкочастотный мониторинг засоленности орошаемых почв региона исследований. Использование подобного подхода на других территориях, где практикуется зимние промывки затоплением, возможно без дополнительных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке грантового и программно-целевого финансирования Комитета науки, Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, проекты AP14871126 и BR10965172.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянов С.Ф.* Борьба с засолением орошаемых земель. М.: Колос, 1978. 288 с.
2. *Айдаров И.П.* Регулирование водно-солевого и пищевого режимов орошаемых земель. М.: Агропромиздат. 1985. 275 с.
3. *Аширбеков М.Ж.* Солевой режим и эксплуатационная промывка почвы в хлопковом севообороте староорошаемой зоны Голодной степи // Вестник Алтайского ГАУ. 2014. № 5. С. 89–96.
4. *Аширбеков М.Ж., Дридриг В.К.* Урожайность и качество хлопчатника в зависимости от размещения в севообороте на орошаемых сероземах Южного Казахстана // Вестник АПК Ставрополя. 2018. № 1. С. 73–77.
5. *Андроников В.Л.* Аэрокосмические методы изучения почв. М.: Колос, 1979. 280 с.
6. *Боровский В.М.* Формирование засоленных почв и галогеохимические провинции Казахстана. Алма-Ата: Акад. наук Каз. ССР. 1982. 254 с.
7. *Варгас Р., Панкова Е.И., Балюк С.А., Красильников П.В., Хасанханова Г.М.* Руководство по управлению засоленными почвами. Рим: ФАО, 2017. 153 с.
8. *Востокова Е.А., Шевченко Л.А., Сущеня В.А.* Картографирование по космическим снимкам и охрана окружающей среды. М.: Недра, 1982. 251 с.
9. *Рамазанов А., Якубов Х.* Промывные и влагозарядные поливы. Ташкент: Мехнат, 1988. 192 с.
10. *Савин И.Ю., Бербеков С.А., Тутукова Д.А.* Комплексная оценка неоднородности почвенного покрова по состоянию посевов // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2022. № 113. С. 31–57. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-113-31-57>
11. *Савин И.Ю., Отаров А., Жоголев А.В., Ибраева М.А., Дуйсеков С.* Выявление многолетних изменений площади засоленных почв Шаульдерского орошаемого массива по космическим снимкам Landsat // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2014. № 74. С. 49–65. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2014-74-49-65>
12. *Успанов У.У.* (отв. ред). Почвенная карта Казахской ССР. М-б 1 : 2 500 000. М.: ГУГК, 1976.
13. *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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241>
14. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
15. *Abdel Rahman M.A.E., Afifi A.A., D'Antonio P., Gabr S.S., Scopa A.* Detecting and mapping salt-affected soil with arid integrated indices in feature space using multi-temporal landsat imagery // Remote Sens. 2022. V. 14. P. 2599. <https://doi.org/10.3390/rs14112599>
16. *Allbed A., Kumar L.* Soil Salinity mapping and monitoring in arid and semi-arid regions using remote sensing technology: A Review. Advances in remote sensing. 2013. V. 2. P. 373–385. <https://doi.org/10.4236/ars.2013.24040>
17. *Chen Y., Du Y., Yin H., Wang H., Chen H., Li X., Zhang Z., Chen J.* Radar remote sensing-based inversion model of soil salt content at different depths under vegetation // PeerJ. 2022. V. 10. P. e13306. <https://doi.org/10.7717/peerj.13306>
18. *Craig M., Merchant M., Boychuk L., Hopkinson Ch., Brisco B.* Automated SAR image thresholds for water mask production in Alberta's Boreal Region // Remote Sens. 2020. V. 12. P. 2223. <https://doi.org/10.3390/rs12142223>
19. *FAO.* The World Map of Salt Affected Soil [WWW Document]. 2021. URL <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/global-map-of-salt-affected-soils/en/> (accessed 12.03.23)
20. *Iqbal F.* Detection of salt affected soil in rice-wheat area using satellite image // African J. Agricult. Res. 2011. V. 6. P. 4973–4982.
21. *Kraamwinkel C.T., Beaulieu A., Dias T., Howison R.A.* Planetary limits to soil degradation // Commun Earth Environ. 2021. V. 2. P. 249. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00323-3>
22. *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. № 7. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
23. *Metternicht G., Zinck J.A.* Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 85. P. 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00188-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00188-8)
24. *Nguyen K.A., Liou Y.A., Tran H.P., Hoang P.P., Nguyen T.H.* Soil salinity assessment by using near-infrared channel and vegetation soil salinity index derived from Landsat 8 OLI data: a case study in the Tra Vinh Province, Mekong Delta, Vietnam // Prog Earth Planet Sci. 2020. V. 7. P. 1. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0311-0>
25. *Otarov A., Ibrayeva M.A., Usipbekov M., Wilkomirski B., Suska-Malawska M.* Brief description of soil surface and analysis of current state of soil fertility in South Kazakhstan region // J. Soil Sci. Agrochem. 2008. № 1. P. 68–76.
26. *Özelkan E.* Water Body Detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI // Pol. J. Environ. Stud. 2020. V. 29. P. 1759–1769. <https://doi.org/10.15244/pjoes/110447>
27. *Panagos P., Van Liedekerke M., Borrelli P., Köninger J., Ballabio C., Orgiazzi A., Lugato E., Liakos L., Hervas J., Jones A. Montanarella L.* European soil data centre 2.0: Soil data and knowledge in support of the EU policies // Eur. J. Soil Sci. 2022. V. 73. P. e13315. <https://doi.org/10.1111/ejss.13315>
28. *Savin I., Avetyan S., Shishkonakova E.* Secondary Salinization of Soils in Russia // IOP Conf. Ser.: Earth En-

- viron. Sci. 2021. V. 690. P. 012024.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/690/1/012024>
29. Savin I.Y., Savenkova E.V., Kucher D.E., Tutukova D.A., Berbekov S.A. Assessment of soil cover contrasts on arable land using Sentinel-2 images // *Eurasian Soil Sci.* 2021. V. 54. P. 1619–1628.
 30. Scudiero E., Corwin D.L., Anderson R.G., Skaggs T.H. Moving forward on remote sensing of soil salinity at regional scale // *Front. Environ. Sci.* 2016. V. 4. P. 65.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00065>
 31. Wang J., Peng J., Li H., Yin C., Liu W., Wang T., Zhang H. Soil salinity mapping using machine learning algorithms with the Sentinel-2 MSI in arid areas, China // *Remote Sensing.* 2021. V. 13. P. 305.
<https://doi.org/10.3390/rs13020305>
 32. Wu W. A Brief review on soil salinity mapping by optical and radar remote sensing // *Research Developments in Saline Agriculture.* Singapore: Springer, 2019. P. 53–65.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-5832-6_2
 33. 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. P. 596.
<https://doi.org/10.3390/rs9060596>
 34. Yang L., Driscoll J., Sarigai S., Wu Q., Lippitt C.D., Morgan M. Towards synoptic water monitoring systems: a review of ai methods for automating water body detection and water quality monitoring using remote sensing // *Sensors.* 2022. V. 22. P. 2416.
<https://doi.org/10.3390/s22062416>

Satellite Monitoring of Salinization of Irrigated Soils in South Kazakhstan

I. Yu. Savin^{1, 2, *}, A. G. Terekhov³, E. N. Amirgaliev³, and G. N. Sagatdinova³

¹*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

²*Institute of Environmental Engineering of RUDN University, Moscow, 115093 Russia*

³*Institute of Information and Computing Technology, Almaty, 050010 Kazakhstan*

*e-mail: savin_iyu@esoil.ru

The results of approbation of new approaches to monitoring and forecasting of soil salinity of irrigated soils, based on indirect detection of soil salinity using multi-year archives of satellite data, are presented. Research was carried out on example of irrigated lands of Maktaaral district of Turkestan region of the Republic of Kazakhstan. As an indicator of soil salinity level frequency and terms of soil leaching from salts are used, which are identified on the basis of multi-year archives of satellite data Sentinel-1,2 and Landsat-8 (from 2016 to 2022). Information about the frequency of soil leaching from salts and the year of the last leaching allowed ranking the fields by the degree of soil salinity. Comparison of the obtained information with the fine-scale soil map and with statistical data based on field surveys of the fields showed a good level of similarity of the soil salinity level of the test region. A similar approach can be used for other regions with irrigated soils subjected to secondary salinization. It does not require additional adaptation and is based on simple algorithms of recognition from satellite data of water surface.

Keywords: salt flushing, Sentinel-2, Landsat, saline soils, NDVI