



Сочетание подходов дистанционного зондирования и моделирования для оценки засоления почв орошаемых территорий бассейна Аральского моря

Мирзахает Ибрахимов^{а*}, Усман Халид Аван^б, Муроджон Султанов^а, Акмал Акрамханов^б, Кахрамон Джумабоев^в, Кристофер Конрад^{г,д}, Джон Ламерс^е

^а Хорезмская сельская консультационная служба (KRASS), Ургенч, Хорезм, Узбекистан.

^б Международное агентство сельскохозяйственных исследований в засушливых регионах (ИКАРДА), Ташкент, Узбекистан.

^в Международное агентство по управлению водными ресурсами (IWMI), Региональный офис в Центральной Азии, Ташкент, Узбекистан.

^г Институт географии и геологии Вюрцбургского университета, Департамент дистанционного зондирования, Вюрцбург, Германия.

^д Университет Галле, Институт геонаук и географии, Галле, Германия.

^е Центр исследований в области развития (ZEF), Департамент экологии и управления ресурсами, Боннский университет, Бонн, Германия.

* для корреспонденции: lhayot_i@yahoo.com

Данная версия является переводом статьи «Combining remote sensing and modeling approaches to assess soil salinity in irrigated areas of the Aral Sea Basin», опубликованной в журнале 27 мая 2020 г.

IRSTI 70.21.39

doi:10.29258/CAJWR/2019-R1.v5-2/111-127.rus

Аннотация

Точная оценка засоления почв является важным шагом для принятия мер по смягчению последствий деградации сельскохозяйственных земель. С целью оценки засоления широко используются инструменты дистанционного зондирования (ДЗ), однако при этом информация о точности такой оценки отсутствует. Оценка засоления на основе ДЗ в Хорезмской области позволяет получить значение надежности прогноза, имеющее слабую ($R^2=0,15-0,29$) связь между картами засоления, полученными с помощью ДЗ и интерполяцией значений электромагнитной индукции, полученной с помощью инструмента EM38 в фазу роста растений, и более высокую корреляцию ($R^2=0,35-0,56$) в период после орошения. Моделирование с помощью гидрологической модели HYDRUS-1D на слабозасоленных, средnezасоленных и сильнозасоленных участках на различной глубине почв показало, что в результате орошения соли перемещаются с верхних в более глубокие слои, а в период, когда орошение не проводится, эти соли вновь появляются в верхнем профиле почв. В конце периода орошения соли постепенно и стабильно накапливались в верхних слоях почв. Сочетание методов ДЗ с цифровым моделированием позволяет лучше понять динамику засоления по сравнению с применением этих подходов по отдельности. Результаты данного анализа могут представлять интерес для фермеров и лиц, принимающих решения, поскольку сочетание вышеуказанных методов позволит обеспечить лучшее планирование и управление ресурсами.

Ключевые слова: HYDRUS-1D, моделирование солепереноса, Аральское море, орошение, засоление почв

1. Введение

Орошаемое земледелие осуществляется примерно на 20 % сельскохозяйственных площадей во всем мире, но на их долю приходится не менее 40 % мирового производства продовольствия (FAO, 2003). Методы орошения, практикуемые в Центральной Азии, позволяют многократно повышать естественное плодородие земель (www.cawaterinfo.net). Однако неблагоприятные природные условия и нерациональное использование земельных и водных ресурсов во многих засушливых и полусушливых сельскохозяйственных районах приводят к широкомасштабной деградации земель. То же самое относится и к сельскохозяйственным районам в странах Центральной Азии, где степень засоления и заболачивания почв является серьезной угрозой сельхозпроизводству. Оценки засоления почв варьируются от ~11,5 % всех площадей в Кыргызстане до 50 % в Узбекистане и 95,9 % в Туркменистане (Bucknall et al., 2003). На площадях вблизи Аральского моря, таких как Хорезмская и Каракалпакстанская области, практически все сельскохозяйственные районы являются засоленными в различной степени (FAO, 2000). Засоление почв приводит не только к деградации окружающей среды, но и к снижению продуктивности земель и экономическим потерям.

Современные методы оценки засоления почв обычно основываются на отборе почвенных проб для определения концентрации растворенных веществ или измерения электропроводности (ЕС). Эти методы являются точными, однако определение засоления занимает много времени, требуется проведение повторных замеров и зачастую обработки огромного числа образцов. Кроме того, внесение результатов анализов вручную с последующей подготовкой бумажных карт не способствуют возможности быстрого анализа причин и последствий засоления и, следовательно, задерживает распространение информации. Кроме того, наложение полученных карт засоления на другие ключевые виды информации (например, уровень и минерализация грунтовых вод) практически невозможно. Подобные методы неэффективны при проведении детального картирования крупномасштабных ирригационных площадей и при анализе определенных отдельных периодов. В то же время методы, основанные на дистанционном зондировании (ДЗ), позволяют гораздо быстрее проводить оценку больших площадей, в том числе засоление почв (Dwivedi & Rao, 1992, Metternicht & Zinck, 2003; Farifteh et al., 2005; Mulder et al., 2011). Спектральная информация поверхности почв была подробно исследована в период с 1970-х гг. (Hunt et al., 1972; Metternicht, 1998; Furby et al., 2010), но эти исследования главным образом отразили наличие корреляции между индексом засоления почв и растительности, в результате чего этот показатель может быть предсказан в условиях посевных площадей непрямо и лишь в определенной степени. Несмотря на преимущество методов ДЗ при быстром и

широкомасштабном охвате засоления почв, существуют и недостатки данного метода. Это связано с орошением, которое зачастую вносит коррективы в распространение засоления по площади и вызывает перемещение солей по профилю. Metternicht & Zink (2003), Rao et al. (1995) показали, что спектральное отражение верхнего слоя почв в орошаемых районах не позволяет выявить слабую степень засоления. Кроме того, измерения на основе ДЗ по определению ограничены только мониторингом поверхности, тогда как на орошаемых территориях процессы засоления сложны и динамичны, а основная концентрация солей происходит на определенной глубине, не проявляясь на поверхности (Akramkhanov, 2011). Кроме того, в условиях наличия растительного покрова засоление почв с помощью ДЗ можно оценить непрямо, посредством других факторов, например, через стресс сельскохозяйственных культур, видимый при анализе спектральных данных. С другой стороны, невозможно отделить стресс культур в результате засоления от других факторов, таких как стресс от низкой влажности или нехватки удобрений.

Таким образом, существует неопределенность, связанная с оценкой засоления почв при применении подходов ДЗ. При этом точность оценки засоления может быть улучшена с помощью моделирования процессов солепереноса. Моделирование динамики засоления почв позволяет проводить детальные оценки засоления на требуемых глубинах и по времени. При решении требований сбора вводных данных, моделирование может осуществляться в любом месте и на любое количество точек (Šimunek et al., 2008; Oster & Rhoades, 1990). Различные модели оценки засоления решают вопросы переноса растворенных минералов (например, Srinivasulu et al., 2004; Vanderborght et al., 2005; Vrugt & Bouten, 2002), но лишь небольшая их часть объединяет оценку изменения засоления в пространстве и по глубине без требования сбора обширных данных. Таким образом, интеграция информации ДЗ о засолении почв с моделями солепереноса для прогнозирования динамики засоления почв может быть ценным вариантом устранения этого пробела в исследованиях. Целью данного исследования является осуществление более точной оценки и картографирования засоления почв в орошаемых районах путем сочетания методов ДЗ и моделирования динамики солей. Конкретные задачи включали: 1) проверку неопределенности и точности оценки засоления по ДЗ с помощью модели солепереноса и 2) распространение оценки засоления на глубину корневой зоны почв.

2. Материалы и методы

2.1 Область исследования

Исследование проводилось в условиях орошаемой зоны бассейна Аральского моря, в Хорезмской области Узбекистана, расположенной между 41°–42° с. ш. и 60°–61° в. д. Регион граничит с пустынями Каракум и Кызылкум на юге, юго-западе и западе, имеет чрезвычайно засушливый континентальный климат, что создает необходимость орошения сельскохозяйственных культур. Из общей площади

560 тыс. га ежегодно орошается около 270 тыс. га (Akramkhanov et al., 2012). Среднегодовое количество осадков составляет 92 мм, а среднегодовые показатели эвапотранспирации – более 1400 мм (Awan et al., 2011; Conrad et al., 2012). Хорезм – равнинная область, расположенная на высоте 112–138 м над уровнем моря. Топографическая равнинность в сочетании с низкой гидравлической проводимостью почвогрунтов обуславливает чрезвычайно медленные горизонтальные, в основном вертикальные потоки грунтовых вод (ГВ) (Khodjibaev, 1979). Почвы региона в основном аллювиальные, преимущественно илесто-суглинистые (55 %), суглинистые (13 %) и супесчаные (12 %) (Akramkhanov et al., 2012). Неглубокие минерализованные ГВ являются одним из основных факторов распространения засоления почв в области (Ibrakhimov et al., 2007; Forkutsa et al., 2009). В весенний период оросительная вода содержит $1,2 \text{ дСм}^{-1}$ растворенных солей, а в летний сезон – падает до $0,8\text{--}1,0 \text{ дСм}^{-1}$.

Полевые работы проводились в условиях научно-исследовательской станции института хлопководства, в АВП Пахтакор (рис. 1). Общая площадь станции составила 145 га; площадь подрайона, где проводился сбор данных, охватывает центральную часть, 62,8 га. Хлопок выращивается на всех контрольных полях без севооборота. Почвенно-климатические условия района исследований характерны для значительной части Хорезмской области.

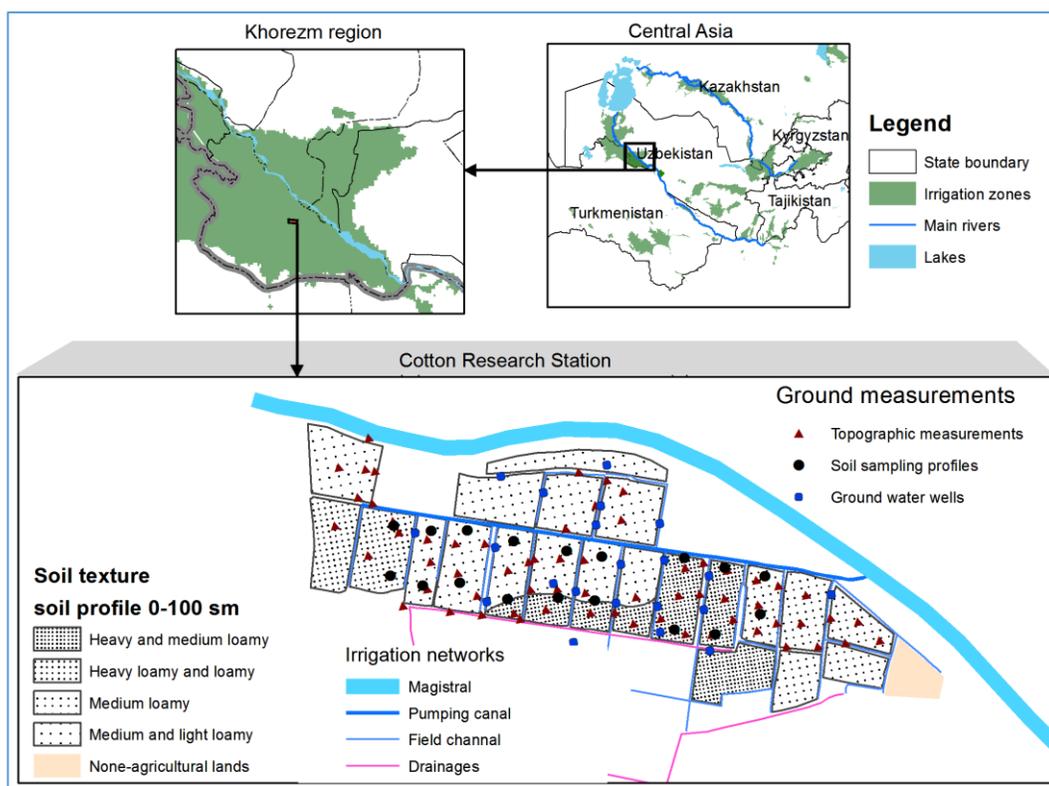


Рис. 1. Географическое местоположение Хорезмской области, расположение исследовательского участка и научно-исследовательской станции института хлопководства

2.2. Сбор данных

Эмпирические данные о засолении почв были собраны путем замера электропроводности (ЕС) и электромагнитной индукции с помощью инструмента EM38 (компании Geonics Ltd) (рис. 1). ЕС засоления почвы и воды измеряли портативным ЕС-метром (ЕС образцов почв, разведенных в соотношении 1:1 с дистиллированной водой) в слоях 0–30, 30–90 и глубже 100 см. Измерения проводились непосредственно до и после случаев вымывания почв, а также в течение вегетационного периода; в целом восемь раз в период с марта по октябрь 2008 и 2009 гг. В 2008 г. данные о засолении были отобраны по некоторым полям, в то время как наиболее полный сбор данных о засолении был собран в 2009 г. Полученная электропроводность ($ЕС_p$ почвенной пасты) была преобразована в сопоставимый с международным стандартом насыщенный почвенный экстракт $ЕС_e$ (Rhoades et al., 1999) в соответствии с формулой $ЕС_e = 3,5 ЕС_p$, которая была выведена экспериментально для исследуемого региона (Forkutsa et al., 2009). На некоторых полях также были установлены сенсоры для автоматического измерения глубины и минерализации грунтовых вод.

EM38 позволяет замерить засоление почв на глубину 75 и 150 см, но полученные показания должны быть откалиброваны по точечным прямым замерам солей. Двадцать образцов ЕС были отобраны в случайно выбранных точках, где проводились замеры EM38. Полученные точки были интерполированы с использованием метода обратных взвешенных расстояний (ОВР) для создания карт засоления по датам замеров.

2.3. Снимки дистанционного зондирования для оценки засоления почв

Десять спутниковых снимков Landsat 5TM с марта по октябрь за период 2008–2009 гг. были использованы для оценки растительных индексов и составления карт засоления на станции хлопководства. Выбранные изображения были атмосферно скорректированы с помощью метода LEDAPS (Masek et al., 2013). Сравнение двух рассмотренных индексов – нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) и почвенно-корректированного вегетационного индекса (SAVI) – показало более высокую связь между картами засоления почв, полученными интерполяцией измерений EM38 и SAVI. Следовательно, этот индекс был отобран для дальнейшего анализа. Основной целью выбора одного индекса является повышение точности прогнозирования засоления с помощью моделирования.

2.4. Моделирование засоления почв

Модель HYDRUS-1D (Šimunek et al., 2008) была использована для моделирования водо- и солепереноса на основе ее проверенной калибровки и валидации для данного региона (отмечено в работах Forkutsa, 2009; Awan, 2009). Чтобы оценить точность прогноза подхода ДЗ, модель HYDRUS была создана для трех участков со слабо-, средне- и сильнозасоленными почвами. Затем эти участки были выбраны на основе данных карт засоления ДЗ и EM38. Период моделирования включал 2008–2009 гг.

Динамика движения влаги в почвенном профиле моделируется с помощью уравнения Ричардса:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(h), \quad (1)$$

где θ – объемное содержание воды в почве [$\text{см}^3 \text{см}^{-3}$];

t – время [d];

h – напор грунтовой воды [см];

z – гравитационный уровень, а также вертикальная координата [см], (направление вверх означает положительное значение);

$K(h)$ – ненасыщенная гидравлическая проводимость [см d^{-1}];

S – скорость извлечения почвенной воды корнями растений [$\text{см}^3 \text{см}^{-3} \text{d}^{-1}$].

Для параметризации уравнения Ричардса была использована модифицированная модель Муалема–ван Генухтена для описания удержания воды в почве и гидравлической проводимости (Vogel & Císlerová, 1988). Для моделирования суточных временных шагов использовались ключевые входные данные для HYDRUS, такие как данные об испарении, транспирации и грунтовых водах (Šimunek et al., 2008). Верхние граничные условия для модели определялись орошением и осадками. Объемы применяемой оросительной воды были оценены в трех местах с различными классами засоления. Предполагалось, что одинаковые нормы орошения имели место на всех полях, что оправдано из-за одинаковой структуры посева (хлопок), топографических уклонов и норм подачи воды (насос для всей станции) для всех полей. Нижние граничные условия полностью определялись динамикой уровня грунтовых вод.

Перенос растворенных веществ в HYDRUS-1D обусловлен конвективными и дисперсионными процессами, а также диффузией в газообразном состоянии в почвенном профиле. Плотность солепереноса на орошаемых полях может быть описана как сумма конвективных и дисперсионных потоков, в то время как диффузией газов можно пренебречь (Singh et al., 2003):

$$J = J_{con} + J_{dis}, \quad (2)$$

где J – общая плотность солепереноса [$\text{г}/(\text{см}^2 \text{день})$];

J_{con} – плотность конвекционного потока [$\text{г}/(\text{см}^2 \text{день})$];

J_{dis} – плотность рассеивания потока [$\text{г}/(\text{см}^2 \text{день})$].

Это уравнение решается численно для заданных начальных и граничных условий (Šimunek et al., 2008).

Расчеты переноса растворенных веществ проводились на глубину 300 см, что является максимально глубоким уровнем ПВ, измеренным в течение исследуемого периода. Механический состав почв и объемный вес по исследуемому профилю определяли путем отбора проб с шагом 30 см в глубину до 120 см. Для целей численного моделирования предполагалось, что профиль почвы на всех трех участках разделен на три слоя (0–30 см, 30–90 см и 90–300 см), необходимые для балансовых расчетов.

Необходимые для анализа сценариев климатические данные (например, температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность, осадки, солнечная радиация) измерялись ежедневно мини-метеостанцией, установленной на территории станции хлопководства. Эвапотранспирацию оценивали по уравнению Пенмана-Монтейта (Allen et al., 1998) отдельно с учетом испарения и транспирации хлопка.

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) \times ET_0 \quad (3)$$

Для оценки точности результатов моделирования среднеквадратичная ошибка (RMSE) оценивалась как:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [M(t_i) - S(t_i, b)]^2}{n}}, \quad (4)$$

где $M(t_i)$ – измеренное значение во времени t_i ;

$S(t_i, b)$ – прогнозируемое значение во времени t_i ;

n – число наблюдений.

Преобразование электропроводности почв (дСм^{-1}) в отобранных участках на полях станции в единицы миллиграммов солей на см^3 проводилось в соответствии с соотношениями, разработанными Forkutsa et al., (2009) для Хорезмской области:

$$\text{TDS}_{\text{soil}} = 0.6546 \times \text{EC}_e, \quad (5)$$

где TDS представляет собой общее количество растворенных твердых веществ (в мг см^{-3}), и EC_e к электропроводности насыщенного экстракта (дСм^{-1}). Концентрацию солей в растворе рассчитывали по расчетной TDS, объемному весу грунта на заданных глубинах и содержанию почвенной воды (θ , см^{-3} воды на см^{-3} почвы).

3. Результаты

3.1. Оценка засоления почв с помощью измерений электромагнитной проводимости и дистанционного зондирования

На основе интерполяции измерений EM38 за 2008 и 2009 гг. были составлены карты засоления почв хлопковых полей станции хлопководства, которые выявили неоднородные закономерности засоления в разрезе полей с участками слабого, среднего и сильного засоления (рис. 2 и рис. 3). Степень засоления соответствуют диапазонам EM38 от 0 до 50 (слабое), 50–80 (среднее) и 80–160 (сильное) мСм см^{-1} . Наиболее обширные сильнозасоленные участки появились в западной и восточной частях станции хлопководства (поля 20–22 и 25–27).

Кроме того, в то время как высокое засоление полей 20–22 (к востоку от центра) оставалось относительно неизменным в течение всего периода наблюдений, в западной части соли исчезли и вновь проявились в период июня–октября 2009 г. В целом поля с 20 по 26 были частично средnezасоленными, в то время как остальные поля можно охарактеризовать как слабозасоленные. В октябре слабо-, средне- и сильнозасоленные участки соответственно составляли 52 %, 31 % и 17 % от общей площади. Таким

образом, структура посевов и хозяйственная деятельность спровоцировали увеличение средне- и сильнозасоленных площадей за счет слабозасоленных.

Общее засоление почв всей станции и отдельных полей, предсказанное с помощью ДЗ, варьировалось от слабого до сильного, причем на некоторых полях также наблюдались очаги (локальные участки) засоления. Поля с 20 по 22 в основном засолены, в то время как в западной части станции хлопководства преобладает средняя степень засоления. Площади засоления, оцененные с помощью подхода ДЗ в октябре, составили примерно 82 % слабозасоленных, 10 % среднезасоленных и 8 % сильнозасоленных почв.

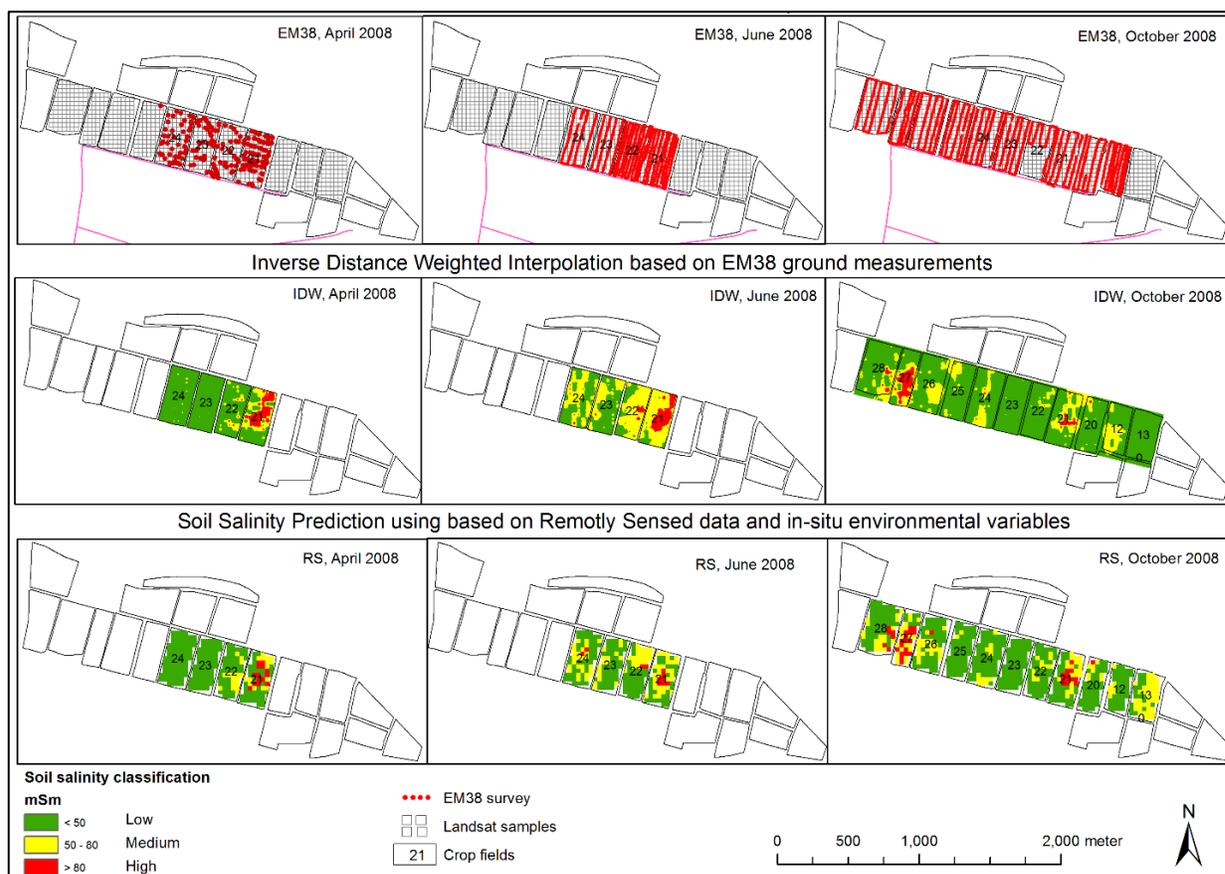


Рис. 2. Карты засоления почв на основе интерполяции измерений EM38 и методов ДЗ в 2008 г. Зеленый цвет указывает на слабое засоление, желтый – на среднее засоление, красный – на сильную степень засоления.

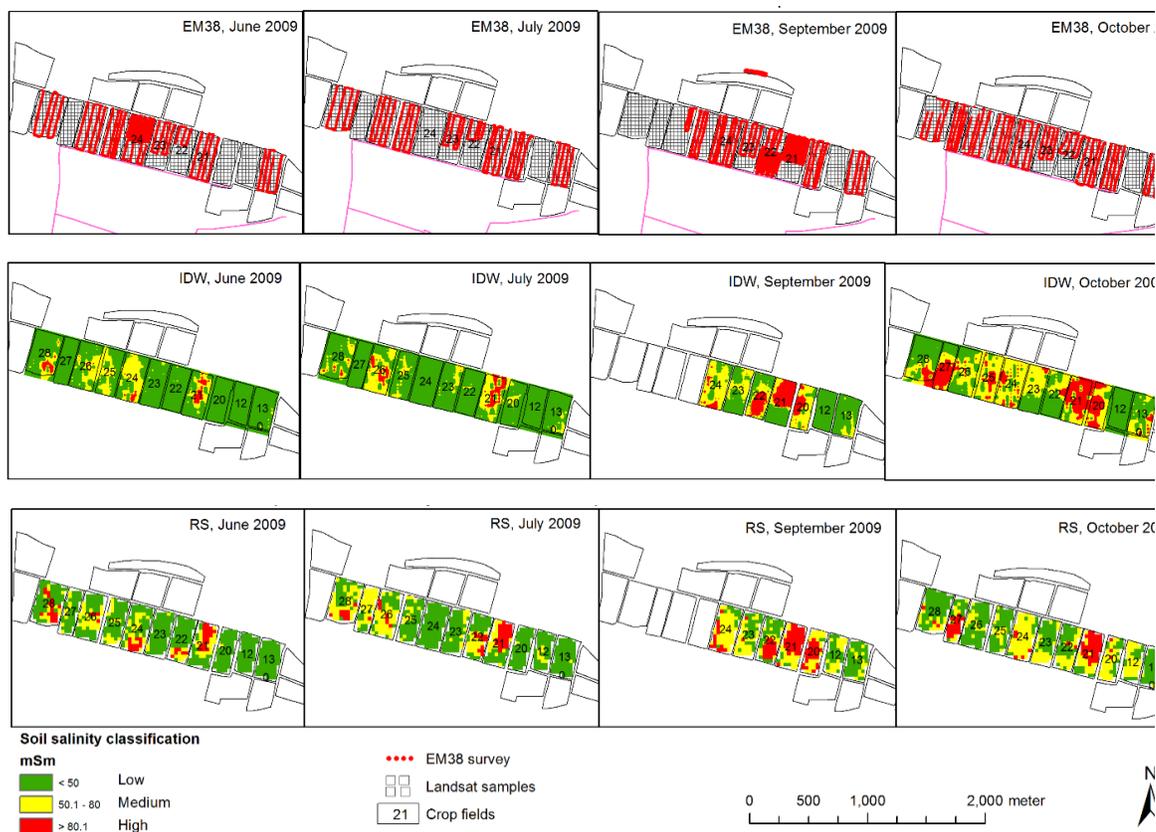


Рис. 3. Карты засоления почв на основе интерполяции измерений EM38 и методов ДЗ в 2009 г. Зеленый цвет указывает на слабое засоление, желтый – на среднее и красный – на сильную степень засоления.

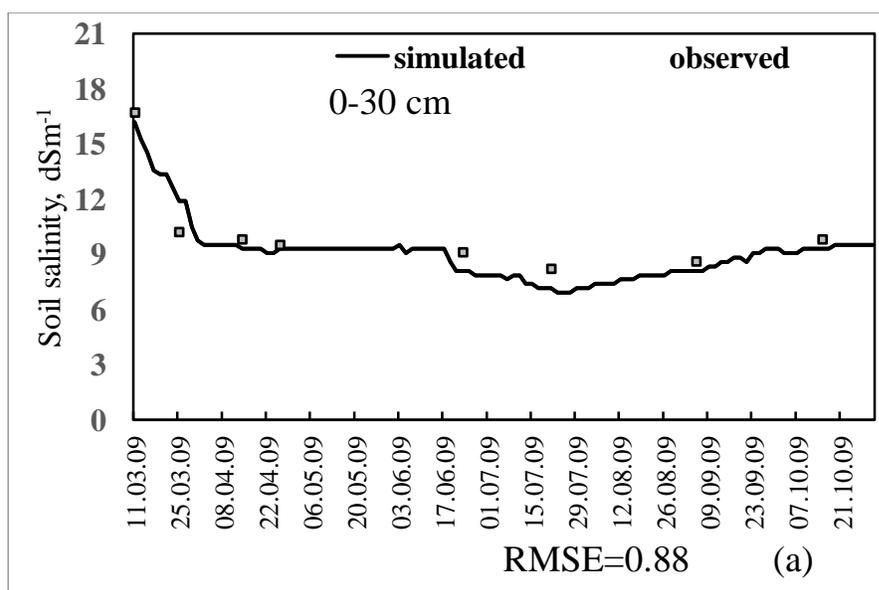
Визуальное сравнение карт указывает на сходство пространственного распределения засоления почв в пределах исследуемой территории. Например, в восточной части, в центре и в западной части станции хлопководства преобладали слабозасоленные участки, тогда как сильнозасоленные участки проявились в западных частях и к востоку от центра. Однако дальнейшее сравнение карт засоления показало, что, за исключением распределения засоления в сентябре и октябре 2009 г., карты ДЗ в оба года исследования отклонялись от закономерностей измерений EM38. Особенно в пиковые периоды выращивания хлопка классификация, основанная на ДЗ, в 2008 г. занижала средnezасоленные районы более чем на 30 %, а сильнозасоленные – более чем на 50 %, в то время как слабозасоленные почвы были завышены более чем на 20 % (табл. 1). Коэффициент корреляции карт, подготовленных обоими методами за период с июня по июль 2009 года, колебался в пределах 0,15–0,29 ($P>0,05$). В то же время корреляция карт вне период интенсивного орошения (сентябрь и октябрь 2009 г.) соответственно возросла до 0,35–0,56 ($P>0,05$).

Таблица 1. Площади (га) со слабым, средним и сильным засолением почв на исследуемой площади 62,8 га с помощью электромагнитного индуктометра (ЕМ38) и ДЗ (2008 г. и 2009 г.). Корреляция между измерениями ЕМ38 и классификацией на основе ДЗ показана только для 2009 г.

Степень засоления	Слабая		Средняя		Сильная		Общая площадь, га		Корреляция Пирсона
	ЕМ38	ДЗ	ЕМ38	ДЗ	ЕМ38	ДЗ	ЕМ38	ДЗ	
Дата									
06/08	17	21	4	3	3	1	25	25	-
07/08	9	15	13	8	3	1	25	25	-
10/08	46	46	13	14	4	3	63	63	-
06/09	13	11	5	5	5	5	63	63	0,29
07/09	13	16	5	5	5	5	63	63	0,15
09/09	12	17	8	6	8	6	39	39	0,35
10/09	19	23	10	9	10	9	62,8	62,8	0,56

3.2 Калибровка и моделирование засоления почв с помощью HYDRUS-1D

Для моделирования динамики засоления почв с помощью модели HYDRUS были выбраны три участка со слабо-, средне- и сильнозасоленными полями (поле 23, поле 26 и поле 28 соответственно). Решение о выборе полей для моделирования принималось путем визуального осмотра и учета полноты набора данных. В этих областях подробное описание профиля почвы, количество показаний ЕС и ЕМ38 и наборы данных сенсоров уровня грунтовых вод позволили улучшить анализ моделирования. Моделирование (рис. 4) точно воспроизвело динамику засоления для глубин 0–30 см и >100 см, о чем свидетельствует RMSE в диапазоне от 0,59 до 0,89 dSm⁻¹. В то же время RMSE для глубин 30–100 колеблется в пределах 0,96–1,16 dSm⁻¹, подразумевая, что изменения засоления преобладали в динамике нисходящего орошения и восходящего вклада грунтовых вод. В целом модель достаточно хорошо отражала степень засоления.



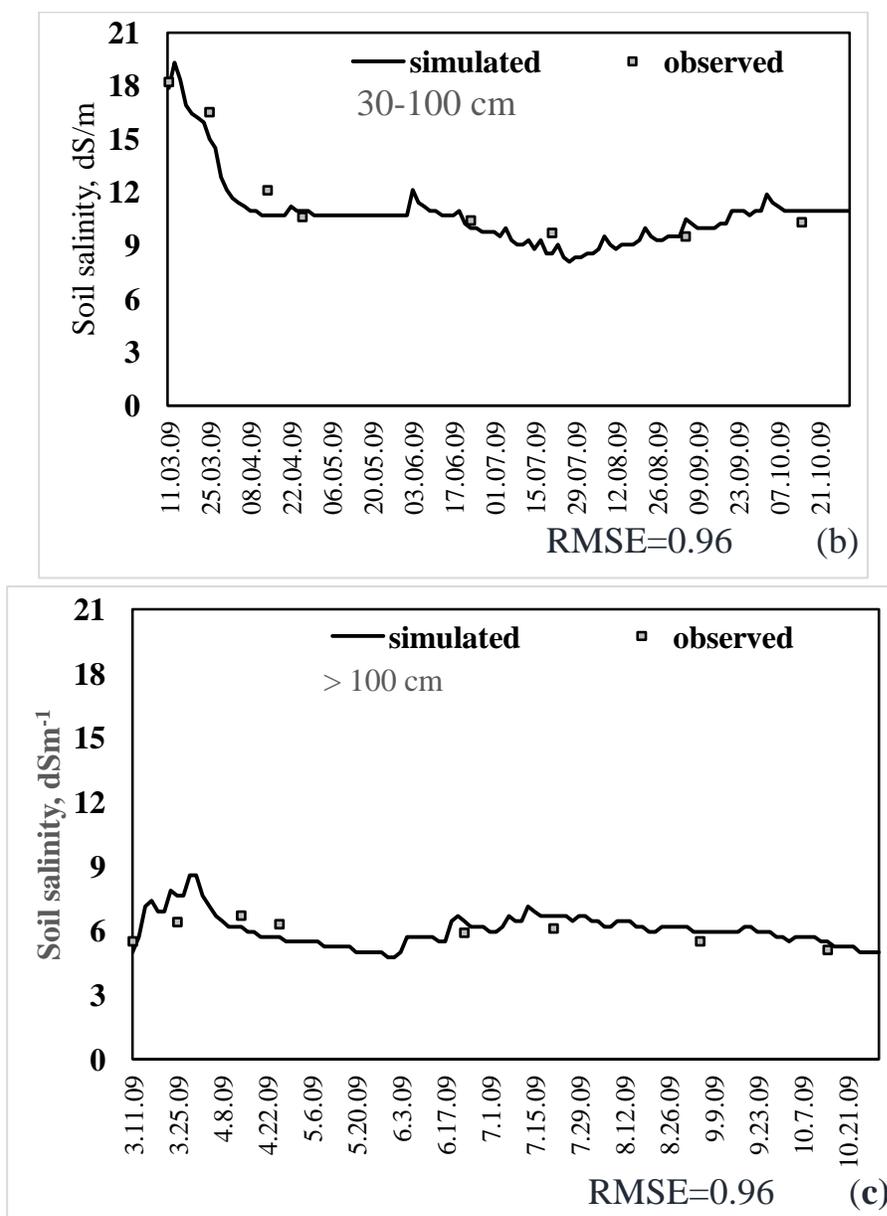


Рис. 4. Наблюдаемое (квадраты) и моделируемое (линии) засоление почвы (dSm^{-1}) на глубине 0–30 см (а), 30–100 см (б) и >100 см (в) на сильнозасоленном участке станции хлопководства (2009 г.)

Вымывание сильнозасоленного участка снизило динамику засоления почв верхнего слоя (0–30 см) примерно до $7\text{--}10 \text{ дСм}^{-1}$, что привело к колебаниям между средней и сильной степенью засоления в течение всего сезона. На глубинах 30–100 см степень засоления почв после вымывания уменьшилась, как и ожидалось, но тем не менее оставалась на критическом (сильнозасоленном) уровне – $8\text{--}12 \text{ дСм}^{-1}$. Наблюдения по другим слоям почв показало, что в целом засоление сразу же после орошения снижалось, но в период между орошениями повышалось. В целом, соли перемещались

ниже 100 см, что приводило к увеличению засоления в этом горизонте от слабой/средней до средней/высокой степени, о чем свидетельствует диапазон от 5 до 9 дСм⁻¹.

4. Обсуждение

В данном исследовании засоление почв было успешно определено и нанесено на карту в орошаемом земледелии с использованием методов ДЗ, но, как уже отмечалось ранее, точность таких оценок остается критической (Metternicht & Zinck, 2003). Кроме того, несмотря на то что в почвенном профиле может накапливаться значительное количество солей, методы, основанные на ДЗ, практически не смогут обнаружить такую ключевую информацию (Farifteh et al., 2005). Полученные в данном исследовании результаты показали, что данный недостаток подхода ДЗ может быть успешно устранен сочетанием косвенной оценки ДЗ с моделированием переноса влаги и растворенных веществ. Для исследуемой территории применялся единственный стресс-фактор растительности (засоление почв), и только хлопок – культура, которая является индикатором при исследовании засоления почв (Golovina et al., 1992; Metternicht & Zinck, 2008). Однако предположение о том, что при выращивании хлопка стресс связан только с засолением почв, было оправдано не только из-за общей хорошей влагоудерживающей способности почвы в условиях станции хлопководства, но и из-за одинакового управления земельными и водными ресурсами, осуществляемого на различных контролируемых полях. Кроме того, подобная водообеспеченность, отсутствие проблем с водоснабжением (обеспечиваемое одним насосом на большом оросительном канале) и относительная топографическая равнинность всех исследуемых полей оправдывали это предположение.

Таким образом, полученные результаты показали, что подходы ДЗ в сочетании с моделированием переноса растворенных веществ в почвенном профиле могут успешно прогнозировать динамику засоления почв, в отличие от каждого из этих методов по отдельности. Кроме того, визуальное сравнение карт засоления, созданных с помощью замеров ЕМ38, и карт, предсказанных ДЗ-подходом для хлопковых полей, показало четкую взаимосвязь между результатами обоих подходов. Таким образом, текущие результаты вместе с результатами, полученными Abbas et al. (2013) и Lhissou et al. (2014) для орошаемых районов в аналогичных экологических условиях (в Марокко и Пакистане), подтвердили преимущества разграничения сходных пространственных закономерностей засоления почв, выявленных с помощью обоих подходов. Кроме того, зависимость между показаниями ЕМ38 и оценками на основе ДЗ была ниже ($R^2=0,15-0,29$) в периоды орошения (июнь, июль), но увеличилась ($R^2=0,35-0,56$; см. табл. 1) вне периодов интенсивного орошения (сентябрь, октябрь). Эта зависимость на более низком уровне в течение вегетационного периода, вероятно, была вызвана серией интенсивных орошений, которые, в свою очередь, способствуют снижению концентрации засоления и перемещению солей в более глубокие горизонты. Поэтому

информация о ключевых факторах, таких как влажность, механический состав почв и условия хозяйствования, часто указывается как ограничивающая точность оценки и, следовательно, полезность картирования засоления почвы на основе ДЗ (Metternicht & Zink, 2003).

Методы, основанные на ДЗ, позволяют проводить оценку засоления только в фиксированный момент времени, а именно во время получения спутникового снимка. Однако различные факторы могут изменить состояние растительности и с течением времени сделать использование методов оценки засоления с помощью ДЗ менее эффективным (Metternicht & Zink, 2003; Farifteh et al., 2005). Сюда входит, например, величина и влияние засоления из-за различий в объемах подаваемой воды или нехватки воды, а также из-за изменений уровня и минерализации ГВ, что все это может ускорить развитие зеленой биомассы более сильных растений и т. д. В то же время моделирование позволяет симулировать не только состояние, но и динамику засоления на различных глубинах с учетом вышеперечисленных факторов. На рис. 4 показаны быстрые изменения засоления почв в периоды орошения, которые постепенно движутся вверх вплоть до последних ирригационных мероприятий (с конца августа). Хотя снимки ДЗ могут быть получены в период быстрого изменения засоления, подход моделирования позволяет гораздо более точно предсказать засоление в этот момент времени.

Данные результаты указывают на то, что динамика засоления почв может быть хорошо зафиксирована с помощью моделирования в пространстве и времени. Смоделированная динамика солей показала, что модель переноса растворенных веществ хорошо предсказывает снижение засоления почв в сентябре и октябре из-за отсутствия орошения (рис. 4) в исследуемом году. Следовательно, имитировалось не только снижение засоления почв во время поливных мероприятий, но и удаление солей в это время. Это показало, что данный подход способен не только фиксировать временные изменения концентраций и степени засоления почвы, но и одновременно демонстрировать эффекты того, что хлопок более устойчив к засолению почв. Эти двойные эффекты менее выражены непосредственно вне периодов орошения.

Модель HYDRUS-1D симулирует засоление почв по вертикальному профилю при разделении на три слоя: верхний 30 см, 30–100 см и ниже 100 см до грунтовых вод. Низкий RMSE, колеблющийся между 0,59–0,89 дСм⁻¹ в верхнем слое почвы и выше 100 см, но более высокий (0,96–1,16 дСм⁻¹) в слое 30–100 см (рис. 3) свидетельствует об успешном применении модели для симуляции временной динамики засоления в течение сельскохозяйственного сезона при возделывании хлопчатника. Это подтверждает ранние результаты (например, Forkutsa et al., 2009) для Хорезмской области, которые, однако, были выше на 1,4 и 3,2 дСм⁻¹.

Аналогичным образом моделирование показало снижение степени засоления почв после ирригационных мероприятий, которое постепенно увеличивалось в периоды между орошением. Моделирование выявило даже колебания степени засоления от сильной до средней, а в некоторых случаях даже до слабого засоления. Однако

процессы, приводящие в основном к накоплению и изменениям засоления, не могут быть зафиксированы с помощью методов ДЗ. Таким образом, относительно низкая корреляция классификации засоления в июне и июле свидетельствует о быстрых изменениях засоления почв из-за орошения в сочетании с последствиями движения грунтовых вод. Это объясняет, почему непосредственно вне периода орошения (начиная с середины августа) связь между оценками с помощью ДЗ и результатами моделирования усиливается.

Таким образом, моделирование динамики солей по профилю почв является вспомогательным методом, дополняющим метод ДЗ и облегчающим существующий основной недостаток подхода ДЗ, заключающийся в точности картирования различной степени засоления почвы на любой глубине. Моделирование влажности и растворенных веществ требует однократных (например, механический состав почв) или непрерывных (даты и объемы орошения, глубина грунтовых вод, EC_s и EC_w и т. д.) замеров и требовательно к входным данным. Моделирование анализа также требует экспертных знаний, огромных первоначальных усилий для правильной калибровки для локальных участков, что в некотором роде ограничивает широкое практическое применение (Bastiaanssen et al., 2007). С другой стороны, потенциал ДЗ для точного отображения различной степени засоления остается ограниченным, что подтверждается низкой корреляцией между некоторыми индексами ДЗ, такими как индекс засоления и нормализованный разностный индекс засоления (Metternicht & Zink, 2003; Bannari et al., 2008; Lhissou et al., 2014). Но в определенных локальных условиях недостатки обоих методов могут быть смягчены при применении обоих методов к взаимной выгоде как землепользователя, так и лиц, принимающих решения. Таким образом, итоговая интегральная методология становится способной точно и на большой территории оценивать засоление почв на орошаемых площадях, что крайне необходимо планировщикам и землепользователям, стремящимся улучшить планирование и оценить влияние смягчающих и корректирующих мер.

5. Заключение

Результаты этого исследования показали, что методы ДЗ могут быть надежно использованы для классификации и картографирования засоления почв в орошаемых районах хлопководства бассейна Аральского моря. Об этом свидетельствуют результаты исследования на примере Хорезмской области, где имелись все необходимые данные. Однако сравнение подхода ДЗ с прямыми измерениями засоления с использованием EM38 совместно с ДЗ показало сильную взаимосвязь только к концу вегетационного сезона, в то время как в период интенсивного орошения (июнь–август 2009 г.) эта корреляция оказывается значительно ниже. Кроме того, при использовании ДЗ-подхода не имеется никакой информации о вертикальном распределении засоления в пределах почвенного профиля, хотя это имеет решающее значение для принятия решения о мерах по снижению уровня засоления. Тем не менее,

как только пространственная оценка засоления была объединена с моделированием, появилась ценная информация о причинах сезонной динамики засоления. Результаты моделирования степени засоления на сильнозасоленном участке подтвердили эмпирические результаты и таким образом обеспечили получение количественной информации и динамики засоления. Сочетание методов ДЗ с численным моделированием обеспечило ценное понимание динамики засоления почв, что, в свою очередь, позволяет лучше планировать стратегию землепользования. Использование ДЗ для идентификации и картирования засоления может быть ограничено, поскольку прочие сезонные или долгосрочные факторы стресса культур (нехватка влаги в почве, изменение воздействия грунтовых вод и т. д.) могут повлиять на точность. В таких случаях моделирование будет иметь еще большую ценность не только для оценки, но и для прогнозирования засоления почвы. Это должно быть полезно производителям хлопка во всех странах Центральной Азии из-за сходных агроэкологических условий.

6. Благодарности

Данное исследование является частью совместного проекта “Оценка изменения ценности земли и разработка инструмента для поддержки изучения вопроса улучшенного планирования землепользования в орошаемых низовьях Центральной Азии” (LaVaCCA), финансируемого Фондом Volkswagen (Az. 88506). Руководство и материально-техническая поддержка получена от Университета Вюрцбурга (Германия) в рамках проекта LaVaCCA. Авторы хотели бы поблагодарить команду Отдела дистанционного зондирования земли Института географии и геологии Вюрцбургского университета за конструктивные предложения при разработке и написании этой исследовательской работы.

Список литературы

1. Abbas, A., Khan, S., Akbar, S., Hanjra, M.A. and Hussain, N., 2013. Characterizing Soil Salinity in Irrigated Agriculture using a Remote Sensing Approach. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 55–57, pp. 43–52. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.004>.
2. Akramkhanov, A., Martius, C., Park, S. J., and Hendrickx, J. M. H., 2011. Environmental factors of spatial distribution of soil salinity on flat irrigated terrain. *Geoderma*, Vol. 163, No 1–2, pp. 55–62.
3. Akramkhanov, A., Kuziev, R., Sommer, R., Martius, C., Forkutsa, O. and Massucati, L., 2012. Soils and Soil Ecology in Khorezm.
4. Allen, R.G., Pereira, L.C., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements, pp. 1-300 FAO Irrigation and Drainage paper 56. FAO, Rome.

5. Awan, U. K., Tischbein, B., Conrad, C., Martius, C. and Hafeez, M., 2011. Remote Sensing and Hydrological Measurements for Irrigation Performance Assessments in a Water User Association in the Lower Amu Darya River Basin. *Water Resources Management*, Vol. 25, No 10, pp. 2467–2485.
6. Bannari, A., Guedon, A. M., El-Harti, A., Cherkaoui, F. Z. and El-Ghmari, A., 2008. Characterization of Slightly and Moderately Saline and Sodic Soils in Irrigated Agricultural Land using Simulated Data of Advanced Land Imaging (EO-1) Sensor. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Vol. 39, No 19, pp. 2795–2811. Available at: <https://doi.org/10.1080/00103620802432717>.
7. Bastiaanssen, W.G.M., Allen, R.G., Droogers, P., D’Urso, G., Steduto, P., 2007. Review: twenty-five years modeling irrigated and drained soils: state of the art. *Agricultural Water Management*, Vol. 92, pp. 111–125. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agwat>.
8. Bucknall, J., Klytchnikova, I., Lampietti, J., Lundell, M., Scatasta, M. and Thurman, M., 2003. Irrigation in Central Asia: social, economic and environmental considerations. World Bank, Washington, DC, 52p.
9. Conrad, C., Schorcht, G., Tischbein, B., Davletov, S., Sulstonov, M. and Lamers, J. P. A., 2012. Agro-Meteorological Trends of Recent Climate Development in Khorezm and Implications for Crop Production.
10. Dwivedi, R.S., and Rao, B.R.M., 1992. The selection of the best possible Landsat TM band combination for delineating salt-affected soils. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13, pp. 2051–2058.
11. Farifteh, J., Farshad, A. and George, R. J., 2005. Assessing Salt-Affected Soils Using Remote Sensing, Solute Modelling, and Geophysics. *Geoderma*, Vol. 130, No 3-4, pp. 191–206. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.02.003>.
12. FAO, 2000. FAO Global information and early warning system on food and agriculture. Special report: FAO/WFP crop and food supply assessment mission to the Karakalpakstan and Khorezm regions of Uzbekistan. Rome: FAO, 2000.
13. FAO, 2003. Agriculture, Food and Water. ISBN 92-5-104943-2
14. Forkutsa, I., Sommer, R., Shirokova, Y., Lamers, J. P. A., Kienzler, K., Tischbein, B., Martius, C. and Vlek, P. L. G., 2009. Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II. Soil salinity dynamics, *Irrigation Science*, Vol. 27, pp. 319–330.
15. Furby, S., Caccetta, P. and Wallace, J., 2010. Salinity monitoring in Western Australia using remotely sensed and other spatial data. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 39, pp. 16–25.
16. Golovina, N. N., Minskiy, D., Pankova, Y. and Solovyev, D. A., 1992. Automated air photo interpretation in the mapping of soil salinization in cotton-growing zones. *Mapping Sciences and Remote Sensing*, Vol. 29, pp. 262–268.
17. Hunt, G., Salisbury, J. and Lenhoff, C., 1972. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: V. Halides, phosphates, arsenates, venadates and borates. *Modern Geology*, Vol. 3, pp. 121–132.

18. Ibrakhimov, M., Khamzina, A., Forkutsa, I., Paluasheva, G., Lamers, J. P. A., Tischbein, B., Vlek, P. L. G. and Martius, C., 2007. Groundwater table and salinity: Spatial and temporal distribution and influence on soil salinization in Khorezm region (Uzbekistan, Aral Sea Basin). *Irrigation and Drainage Systems*, Vol. 21, pp. 219–236. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10795-007-9033-3>.
19. Lhissou, R., El Harti, A. and Chokmani, K., 2014. Mapping soil salinity in irrigated land using optical remote sensing data. *Eurasian Journal of Soil Science*, Vol. 3, No 2, pp. 82–88.
20. Marquardt, D. W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol. 11, pp. 431–441.
21. Metternicht, G.I. and Zinck, J. A., 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp. 1–20.
22. Metternicht, G. and Zinck, A., 2008. Remote Sensing of Soil Salinity: Impact on Land Management. CRC Press. Available at: <http://dx.doi.org/10.1201/9781420065039>.
23. Metternicht, G., 1998. Analysing the relationship between ground based reflectance and environmental indicators of salinity processes in the Cochabamba Valleys (Bolivia). *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 24, 359– 370.
24. Mulder, V. L, de Bruin, S., Schaepman, M. E. and Mayr, T. R., 2011 The use of remote sensing in soil and terrain mapping—a review. *Geoderma*, Vol. 162, No 1–2, pp. 1–19.
25. Oster, J. D. and Rhoades, J. D., 1990. Steady state root zone salt balance. In: Tanji, K. K. (ed.), *Agricultural salinity assessment and management manual*. ASCE, New York, pp. 469–481.
26. Rao, B., Sankar, T., Dwivedi, R., Thammappa, S., Venkataratnam, L., Sharma, R. and Das, S., 1995. Spectral behaviour of salt-affected soils. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 16, pp. 2125– 2136.
27. Singh, R., van Dam, J. C. and Jhorar, R.K., 2003. Water and salt balances at farmer fields. In van Dam, J. C. and Malik, R. S. (eds.), *Water Productivity of irrigated crops in Sirsa district, India, integration of remote sensing, crop and soil models and geographical information systems*. Wageningen University, Department of Water Resources, The Netherlands, p. 41-58.
28. Vogel, T. and Cislérova, M., 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in porous media*, Vol. 3, pp. 1-15.
29. Šimunek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M. and van Genuchten, M.Th., 2008. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.0, HYDRUS Software Series 3. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, USA, pp. 315.