

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ УЧАСТКОВ ВТОРИЧНОГО ЗАСОЛЕНИЯ НА БЫВШИХ РИСОВЫХ ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

В. Ф. ПОПОВИЧ, старший научный сотрудник,
Е. А. ДУНАЕВА, кандидат технических наук, заведующий лабораторией,
Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма
(295453, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 150; e-mail: water@crimea.com)

Ключевые слова: засоление, спутниковый мониторинг, вегетационный индекс, Landsat, Крым.

В работе представлены результаты исследований территории бывших рисовых техногенных систем Крыма на предмет выявления с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) признаков вторичного засоления при переходе на богарную систему земледелия. Описываются особенности создания данных систем, построенных около полувека назад в большинстве своем на исходно засоленных почвах различной степени солонцеватости, и функционирования в текущих условиях, а также наиболее вероятные причины возникновения деградационных почвенных процессов на данных землях. Целью работы являлось исследование косвенных параметров, которые могут характеризовать факторы проявления процессов реставрации засоления и его возможную временную и пространственную динамику. Приведено сравнение чувствительности шести вегетационных и пяти специализированных индексов, рассчитанных по данным 2–7-го каналов спутника Landsat 8 (разрешение 30 м) для получения пространственных оценок, ориентированных на локализацию проблемных участков, и даны рекомендации по уровню детализации мониторинговых наблюдений, в том числе с использованием данных ДЗЗ. Наиболее существенное значение параметра отклонения при детектировании деградационных процессов показали нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI Green и индекс засоления, отзывчивый на состояние поверхности – CRSI. Величина разницы их значений для поля в целом и для проблемного участка, выраженная числом среднеквадратических отклонений, достигала 5,0 и 4,3 соответственно. Используемые в работе подходы позволили выявить и локализовать ряд проблемных участков, вместе с тем применение только косвенных показателей может быть неэффективным для диагностики реставрации засоления на ранних стадиях развития деградационных почвенных процессов.

SPACE LOCALIZATION OF THE SECONDARY SALINITY PLOTS ON PREVIOUS RICE MAN-CAUSED SYSTEMS

V. F. POPOVYCH, senior scientist,
Ye. A. DUNAIEVA, candidate of technical science, head of laboratory,
Research Institute of Agriculture of Crimea
(150 Kievskaya str., 295453, Simferopol; e-mail: water@crimea.com)

Keywords: salinization, satellite monitoring, vegetation index, Landsat, Crimea.

The paper presents the results of studies of the territory of former rice technogenic systems of the Crimea on the identification of signs of secondary salinization in the transition to rainfed system of farming, using the Earth remote sensing data (RS). The peculiarities of building of these systems, which were created about half a century ago in the majority on saline soils of different solonetzicity, and functioning in the current conditions, as well as the most probable causes of degradation soil processes on these lands are described. The aim of the work was to study indirect parameters that can characterize the factors of the processes of salinity restoration displaying and its possible temporal and spatial dynamics. Comparison of the sensitivity of 6 vegetation and 5 specialized indices, calculated from the satellite Landsat 8 data of 2–7 channels (resolution 30 m) for obtaining spatial estimates, focused on the localization of problem areas, and recommendations for detailisation of monitoring observations level, incl. using the remote sensing data, are given. The most significant value of the deviation parameter when detecting degradation processes, was shown by the normalized difference vegetation index NDVI Green and the salinity index, responsive to the surface state – CRSI. The difference in their values for the field as a whole and for the problem area, expressed by the number of standard deviations, reached 5.0 and 4.3, respectively. The approaches, used in the work, made it possible to identify and localize a number of problem areas; however, the use of only indirect indicators may not be effective for salinity restoration diagnostics in the early stages of degradation soil processes development.

Положительная рецензия представлена А. Ю. Мельничуком, доктором технических наук, заведующим кафедрой землеустройства и кадастра Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского.

Рисовые системы в Крыму были построены более 50 лет назад в ходе строительства 1-й очереди Северо-Крымского канала (СКК) в приморской части Красноперекоевского и Раздольненского районов, прилегающих к Каркинитскому заливу Черного моря в северо-западной части полуострова и на территориях Джанкойского, Нижнегорского и Советского районов, прилегающих к заливу Сиваш. В большинстве случаев для строительства рисовых систем использовались низкопродуктивные исходно засоленные земли. Общая площадь рисовых систем в Крыму превышала 33 тыс. га.

Исследования, проведенные в 1970-е гг. показали, что уже на период 15-летнего освоения рисовых севооборотов ранее засоленные почвы были существенно рассолены, а данные 2000-х гг. свидетельствовали о практически полной их промывке [1].

После прекращения водозабора в Крым по системе СКК возникла угроза реставрации засоления на части территории бывших рисовых оросительных систем. Анализ временной и пространственной динамики изменения почвенного плодородия на данных участках является актуальной задачей при определении устойчивости функционирования данных территорий с экосистемной точки зрения, так как, несмотря на то что возможные текущие деградационные почвенные процессы направлены к возврату почвенных свойств к сформированному тысячелетиями ранее устойчивому состоянию, переход от высокого уровня специализированного орошаемого земледелия (рентабельность возделывания риса в отдельные годы достигала 45 % и более, а урожайность на многих участках превышала 90 ц/га) к менее интенсивному богарному требует разработки адаптационных мероприятий, в том числе касающихся рациональной организации землепользования на этих территориях.

Цель и методика исследований. Целью исследования является оценка возможности задейст

вия вегетационных и специализированных индексов, полученных по результатам обработки данных дистанционного зондирования Земли, для локализации мест возникновения процессов реставрации засоления на бывших рисовых техногенных системах. Проведенные в 2015–2016 гг. исследования состояния почв бывших рисовых техногенных систем подтвердили переход почвогрунтов рисовых севооборотных систем Крыма (в результате практически полувековой промывки) в качественно новое состояние, с параметрами, свойственными незасоленным почвам, хотя уже в 2016 г. наблюдались признаки, которые могли характеризоваться как «предвестники» начала процесса возврата засоления [1]. Термин «техногенная» система используется для того, чтобы подчеркнуть, что, несмотря на переход к богарной системе земледелия, на этих территориях сохранена разбивка полей на чеки, а также сеть глубоких открытых водотоков, выполняющих в том числе дренажную функцию. Мониторинговые исследования динамики продуктивности посевов с использованием данных ДЗЗ территории бывших рисовых техногенных систем Крыма на уровне полей [2] подтвердили выводы экспедиции Почвенного института им. В. В. Докучаева.

Вместе с тем дополнительные выборочные наземные обследования 2017 г., проведенные ФГБУН «НИИСХ Крыма», а также данные текущего мониторинга Крымской гидрогеолого-мелиоративной экспедиции (Красноперекоевская ГГМП) показали наличие высокой минерализации (выше 10 г/л) грунтовых вод на ряде участков, что при близком их залегании (менее 3 м) в засушливых условиях степной части Крымского полуострова является признаком, напрямую взаимосвязанным с засолением почвы. Поэтому основные задачи исследования заключались в определении параметров, основанных на данных ДЗЗ, позволяющих локализовать места возможного проявления процессов вторичного засоления за счет

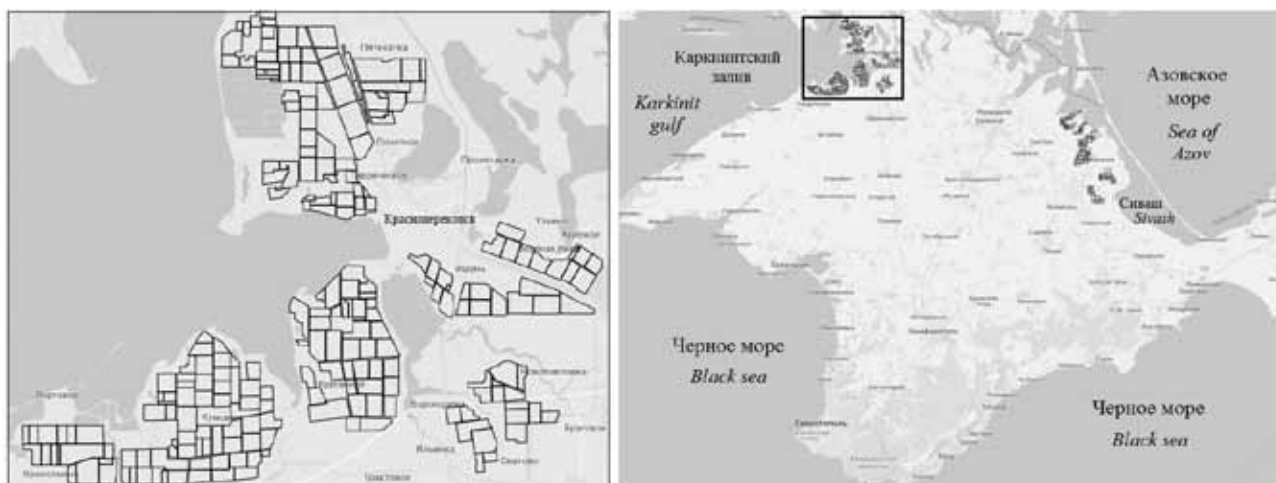


Рис. 1. Расположение рисовых техногенных систем на территории Крымского полуострова и территория зоны исследований
 Fig. 1. Location of rice man-caused systems on the territory of Crimean peninsula and area of investigations

Данные о спутниковых сценах Landsat, использованных для анализа (привязка по WRS2: path/row – 178/028)

Таблица 1

Table 1

Landsat scenes, applied for an analysis (data binding on WRS2: path/row – 178/028)

| Спутник <i>Satellite</i> | Дата <i>Date</i> | Спутник <i>Satellite</i> | Дата <i>Date</i> |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| Landsat 5 | 05.05.2010 | Landsat 8 | 16.05.2014 |
| | 06.06.2010 | | 03.07.2014 |
| | 25.08.2010 | | 19.05.2015 |
| | 24.05.2011 | | 22.07.2015 |
| | 28.08.2011 | | 21.05.2016 |
| Landsat 7 | 06.04.2012 | | 22.06.2016 |
| | 06.08.2012 | | 22.04.2017 |
| Landsat 8 | 27.04.2013 | | 25.06.2017 |
| | 16.07.2013 | | 27.07.2017 |

более детализированного анализа (на уровне чеков), а также задействовании более широкого спектра вегетационных и специализированных индексов.

Территориально ранее построенные рисовые системы в Крыму были большей частью приурочены к Прикаркинитской (Раздольненский и Красноперкопский районы) и Присивашской низменностям (Джанкойский, Нижнегорский и Советский районы) в северо-западной и северо-восточной частях Крымского полуострова соответственно (рис. 1).

После прекращения водозабора и поступления водных ресурсов р. Днепр в Крым в 2014 г. водообеспеченность полуострова сильно уменьшилась, так как в период функционирования канала в течение вегетационного периода (апрель – октябрь) регион дополнительно получал от 3,5 (в советское время) до 1,3–1,5 км³ воды (2005–2013 гг.), которая использовалась в основном на цели орошения и питьевого водоснабжения.

Выборочная оценка постирригационного состояния ранее орошаемых водами Днепра севооборотных участков полевых культур и садов, начатая Почвенным институтом им. В. В. Докучаева в 2015 г. [3], выявила ряд характерных изменений почвенных параметров, связанных со спецификой солевого состава воды Днепра и его изменением при транспортировке по магистральному каналу и разводящей сети до полевого участка в условиях жаркого климата. Изменения в большинстве случаев не очень существенны, с возможной корректировкой их агрохимическими способами. Вместе с тем территории бывших рисовых техногенных систем оказались более уязвимыми (в смысле вероятности возникновения деградационных процессов), особенно поля и участки полей, расположенные близко к береговой линии моря и имеющие минимальные абсолютные отметки.

Изучению возможностей анализа почвенных деградационных процессов с использованием данных ДЗЗ уделяется все больше внимания как в РФ, так и за рубежом [4, 5, 6, 7]. Особенностью данной работы является попытка задействования этих данных для

выявления и пространственной локализации процессов реставрации засоления на базе анализа информации по участкам полей, имеющих чековую структуру, при средней площади чека 2,5–3 га.

Для определения отметок поверхности земли при выборочном обследовании использовались данные нивелировки, а при пространственном анализе – материалы миссии SRTM [8]. С учетом прямой взаимосвязи уровня засоленности почв с минерализацией грунтовых вод (при их близком залегании) на данном этапе исследований во время полевых работ проводилось измерение уровня грунтовых вод в скважинах ручного бурения и измерение уровня их минерализации с использованием полевого кондуктометра.

Создание векторных масок полей рисовых техногенных севооборотных участков и их чековой структуры, а также анализ спутниковой информации проводились с задействованием инструментария открытого программного обеспечения ГИС и обработки спутниковых изображений (QGIS, версия 2.14; ILWIS, версия 3.8).

Данные спутников Landsat 5 (2010–2011 гг.), Landsat 7 (2012 г.) и Landsat 8 (2013 г.) использованы для идентификации полей с возделыванием риса в рисовом севообороте для проверки того, что на полях с сохранившейся чековой инфраструктурой рис продолжал выращиваться в период 2010–2013 гг. (доля риса в различных севооборотах в отдельные годы колебалась от 30 до 70 %). Для анализа ситуации в период 2014–2017 гг. использованы данные сенсора OLI спутника Landsat 8 (табл. 1).

Поскольку на территории бывших рисовых техногенных систем Крыма процесс реставрации засоления находится в начальной стадии, в настоящем исследовании проведен сравнительный анализ использования для целей локализации участков возможного вторичного засоления комплекса индексов, входящих в типовой набор обработанных данных спутника Landsat 8 [9]. Эти индексы используются в стандартных определениях и выгружены из баз данных с открытым доступом USGS по материалам

Таблица 2
Оценки применимости различных индексов для локализации мест реставрации засоления
(на примере чека, п. 5, севооборот 3, ООО «Штурм Перекопа»)

Table 2
Evaluation of set of indexes applicability for localization of areas of salinity restoration
(by the example of field 5, rotation 3, «Shturm Perekopa» LTD)

| Индекс Index | 22.07.2015, подсолнечник sunflower | | | 21.05.2016, яровой ячмень spring barley | | | 25.06.2017, подсолнечник sunflower | | | 27.07.2017, подсолнечник sunflower | | |
|-----------------|--|--------------|-----|---|--------------|-----|--|--------------|-----|--|--------------|-----|
| | Среднее Average | | z | Среднее Average | | z | Среднее Average | | z | Среднее Average | | z |
| | Поле Field | Чек Check | | Поле Field | Чек Check | | Поле Field | Чек Check | | Поле Field | Чек Check | |
| NDVI | 0,812 | 0,759 | 3,5 | 0,781 | 0,794 | 0,4 | 0,602 | 0,459 | 3,5 | 0,497 | 0,451 | 2,3 |
| EVI | 0,734 | 0,615 | 3,3 | 0,596 | 0,614 | 0,4 | 0,431 | 0,329 | 3,4 | 0,368 | 0,332 | 1,9 |
| SAVI | 0,632 | 0,549 | 3,3 | 0,535 | 0,548 | 0,4 | 0,407 | 0,314 | 3,2 | 0,334 | 0,301 | 2,2 |
| MSAVI | 0,670 | 0,564 | 3,3 | 0,548 | 0,564 | 0,3 | 0,391 | 0,291 | 3,0 | 0,312 | 0,277 | 2,2 |
| NDMI | 0,456 | 0,386 | 3,0 | 0,449 | 0,466 | 0,4 | 0,175 | 0,059 | 3,0 | 0,140 | 0,082 | 2,2 |
| NBR | 0,718 | 0,650 | 2,7 | 0,665 | 0,681 | 0,4 | 0,382 | 0,210 | 3,2 | 0,353 | 0,263 | 2,6 |
| NBR2 | 0,392 | 0,355 | 1,9 | 0,312 | 0,316 | 0,2 | 0,225 | 0,153 | 3,1 | 0,225 | 0,186 | 3,0 |
| NDVI Green | 0,715 | 0,660 | 5,0 | 0,691 | 0,703 | 0,4 | 0,602 | 0,459 | 3,5 | 0,497 | 0,451 | 2,3 |
| GDVI | 0,978 | 0,962 | 4,0 | 0,968 | 0,973 | 0,4 | 0,596 | 0,497 | 3,8 | 0,493 | 0,466 | 1,8 |
| CRSI | 0,877 | 0,860 | 4,3 | 0,865 | 0,867 | 0,3 | 0,851 | 0,810 | 4,1 | 0,782 | 0,766 | 2,7 |
| SI | 0,304 | 0,273 | 3,4 | 0,247 | 0,248 | 0,1 | 0,319 | 0,337 | 1,3 | 0,247 | 0,248 | 0,1 |

высокоуровневой обработки или рассчитывались для информации каналов, откорректированной на уровень земной поверхности [10].

Индексы определены по следующим зависимостям (в формулах используются данные 2–7-го («B2»... «B7») каналов спутника с соответствующими значениями числовых параметров): нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), $NDVI = (B5 - B4) / (B5 + B4)$; усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index, EVI), $EVI = 2,5 \times (B5 - B4) / (B5 + 6 \times B4 - 7,5 \times B2 + 1)$; почвенно-адаптированный вегетационный индекс (Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI), $SAVI = 1,5 \times (B5 - B4) / (B5 + B4 + 0,5)$; модифицированный почвенно-адаптированный вегетационный индекс или индекс растительности с коррекцией по почве (Modified Soil Adjusted Vegetation Index, MSAVI), $MSAVI = (2 \times B5 + 1 - ((2 \times B5 + 1)^2 - 8 \times (B5 - B4))^{0,5}) / 2$; нормализованный разностный индекс влаги (Normalized Difference Moisture Index, NDMI), $NDMI = (B5 - B6) / (B5 + B6)$; нормализованный индекс гарей (Normalized Burn Ratio, NBR), $NBR = (B5 - B7) / (B5 + B7)$ и нормализованный индекс гарей 2 (Normalized Burn Ratio 2, NBR2), $NBR2 = (B6 - B7) / (B6 + B7)$.

При этом необходимо отметить, что ряд вегетационных индексов ранее был разработан или предложен для использования в качестве более специализированных (не вегетационных) индексов. Например, нормализованный разностный инфракрасный индекс (Normalized Difference Infrared Index, NDII

[11]) и нормализованный разностный водный индекс (Normalized Difference Water Index, NDWI [12]) имеют альтернативную аббревиатуру и наименования, хотя рассчитываются аналогично NDMI.

Дополнительные индексы, имеющие согласно литературным источникам высокий уровень связи с параметрами почвенного засоления, определены по следующим формулам: нормализованный разностный зеленый вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index Green, NDVI Green [13]), $NDVI\text{Green} = (B5 - B3) / (B5 + B3)$; обобщенный разностный вегетационный индекс (Generalized Difference Vegetation Index, GDVI [14]), $GDVI = (B5^2 - B4^2) / (B5^2 + B4^2)$; индекс засоления, отзывчивый на состояние поверхности (Canopy Response Salinity Index, CRSI [15]), $CRSI = ((B5 \times B4 - B3 \times B2) / (B5 \times B4 - B3 \times B2))^{0,5}$; индекс засоления (Salinity Index, SI [6]), $SI = B5 \times B4 / B3$.

Результаты исследований. Оценка уровня изменений, происшедших на ранее орошаемых рисовых техногенных системах, выполненная с использованием набора косвенных показателей (индексов), основанных на данных ДЗЗ, позволила выявить закономерности их пространственной вариации по территории.

На ранее исходно засоленных почвах бывших рисовых техногенных систем определены зоны повышенного риска возникновения деградационных процессов (расстояние от моря менее 1000 м и абсолютная отметка не более 3 м) и проведено их более детальное картирование с выделением границ чеков (в том числе для каждого чека определена средняя отметка по результатам обработки данных

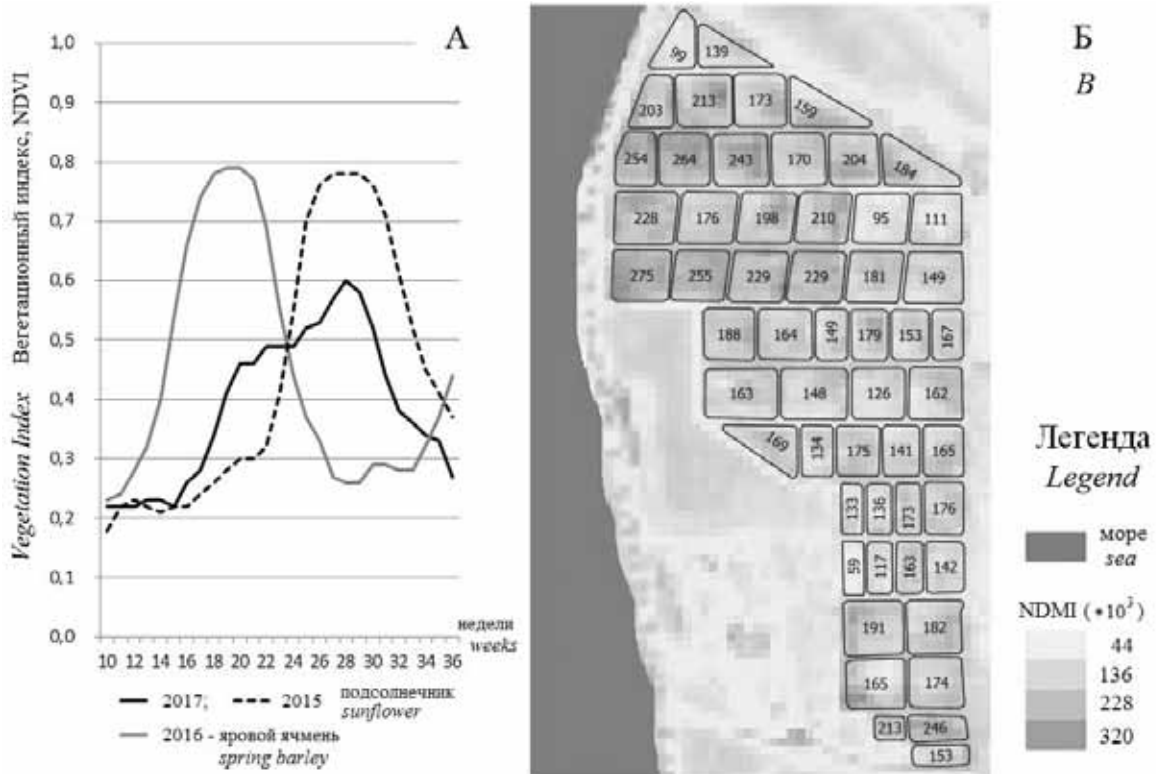


Рис. 2. Варьирование NDVI по годам (А, данные MODIS, сервис «Vege-Science») и значения NDMI по данным спутника Landsat 8 за 25.06.2017 г. (Б, поле № 5, с/о 3)
 Fig. 2. Variation of NDVI by the years (A, MODIS data, service «Vege-Science») and NDMI values by Landsat 8 for 25.06.2017 (B, field No 5, rotation 3)

STRM [8]). Для всех полей, попавших в зону риска, в том числе для каждого чека внутри поля, проведен расчет всего перечня рассматриваемых в работе индексов, включая значения параметров их варьирования. В качестве оценки величины отклонения средних значений параметра по чеку от среднего значения по полю принята величина отклонения среднего значения индекса по полю k_p и по чеку k_c в единицах среднеквадратического отклонения для всего поля σ_n ($z = |(k_p - k_c) / \sigma_n|$).

График варьирования NDVI по годам (построенный по данным сервиса «Vege-Science», ИКИ РАН [16]) показывает сдвиг, характеризующий сравнительную разницу в сроках онтогенеза, связанную в первую очередь с уровнем влагообеспеченности посевов подсолнечника в 2015 и 2017 гг. (рис. 2А), а картирование средних по чекам значений индекса NDMI показывает варьирование данного параметра внутри поля, позволяющее в сравнении с осредненными характеристиками для всего поля выявить участки с существенными отклонениями и локализовать их для проведения более детальных натурных наблюдений (рис. 2Б, значения параметра для наглядности умножены на 10^3).

Пример результатов оценки применимости различных индексов для локализации мест возможной реставрации засоления приведен в табл. 2 (картирование индекса NDMI для данного чека см. на рис. 2Б). Для всех приведенных индексов более существен-

ные отклонения наблюдались в период интенсивного нарастания биомассы подсолнечника или в период близкий к максимальному ее значению (см. рис. 2А и табл. 2, данные за 2017 г.).

Подсолнечник, учитывая его возможность отбирать воду из глубоких слоев почвы, является хорошим индикатором уровня минерализации грунтовых вод (24,2 г/л на 30 августа 2017 г. для анализируемого в табл. 2 чека), которые при их близком залегании и высокой минерализации стимулируют соленакопление в зоне испарения в верхних слоях почвы. Анализ значений параметров, приведенных в таблице, показывает, что большинство из апробированных индексов могут быть задействованы в качестве критериев для оценки величины отклонения биопродуктивности на участке от поля в целом, что может служить одним из показателей локализации участков начала более интенсивных процессов деградации. В более влажном 2015 г. максимальные расчетные значения отклонений получены при использовании индекса NDVI Green, а в более сухом 2017 г. – CRSI (для снимка за 25 июня 2017 г.).

Выборочные натурные обследования зоны более вероятного риска возникновения деградационных почвенных процессов показали неоднозначные результаты взаимосвязи данных ДЗЗ с уровнем минерализации подземных вод и биопродуктивностью посевов. Анализ данных, приведенных на рис. 3 и в табл. 3, показывает отсутствие (по состоянию на

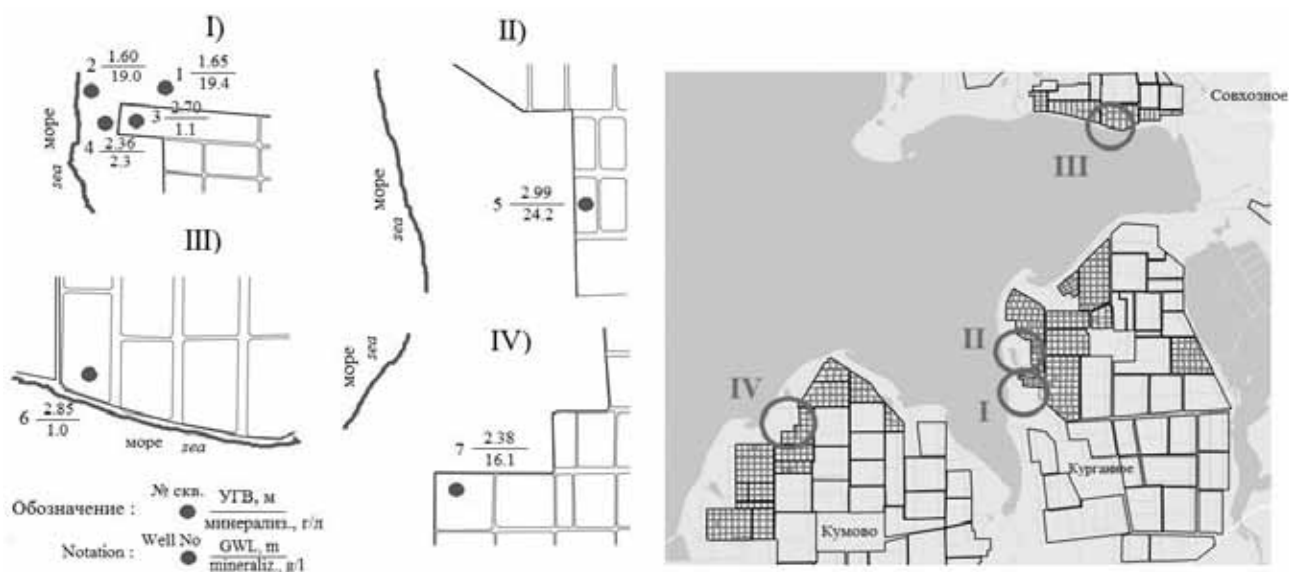


Рис. 3. Расположение пилот-участков и скважин выборочного мониторинга, 2017 г. (границы: — полей; - чеков)
 Fig. 3. Pilot-areas and wells location of sampling monitoring, 2017 (boundary: — fields; - checks)

Таблица 3
 Данные выборочных наблюдений по скважинам за 2017 г.
 Table 3
 Data on sampling observations by wells, 2017

| Скважина, номер Well, number | Минерализация, г/л Mineralization, g/l | Расстояние от моря, м Distance from the sea, m | Отметка поверхности земли, м Altitude, m | Уровень грунтовых вод, м Ground water level, m | Примечание Notes |
|---------------------------------|---|---|---|---|--|
| 1 | 19,4 | 160 | 1,40 | 1,65 | целина (солонец) virgin land (solonetz) |
| 2 | 19,0 | 70 | 1,41 | 1,60 | целина (солонец) virgin land (solonetz) |
| 3 | 1,1 | 195 | 1,19 | 2,70 | в чеке at the check |
| 4 | 2,3 | 140 | 1,23 | 2,36 | целина virgin land |
| 5 | 24,2 | 710 | 1,8* | 2,99 | в чеке at the check |
| 6 | 1,0 | 95 | 1,98 | 2,85 | в чеке at the check |
| 7 | 16,1 | 580 | 1,89 | 2,38 | в чеке at the check |

* средняя отметка на поле по данным SRTM, м
 * average altitude by SRTM data, m

2017 г.) прямой связи между расстоянием от моря и абсолютной отметкой поверхности земли с уровнем минерализации грунтовых вод и состоянием биопродуктивности посевов. Грунтовая вода в скважине № 3, пробуренной на расстоянии 195 м от берега моря в чеке, является практически пресной (минерализация воды, $M = 1,1$ г/л, август 2017 г.), при высокой минерализации в скважинах № 1 и № 2, расположенных на почвах, представленных целинным солонцовым комплексом ($M = 19$ г/л). В скважине № 6, находящейся в чеке на расстоянии 95 м от берега, грунтовые воды – пресные ($M = 1$ г/л).

Примеры обнаруженных на значительном удалении от моря участков с высокой минерализацией грунтовых вод говорят о существенном влиянии на почвенные процессы прочих факторов (например,

динамики локальных грунтовых потоков, периодического подтопления нагонными морскими водами по системе сбросных каналов), а также «маскирующем» влиянии на биопродуктивность солеустойчивости ряда культур (яровой ячмень, скважина № 5 в 2016 г., см. рис. 2А и табл. 2) и использовании в практике земледелия паровых полей (скважина № 7, 2017 г.).

При этом в чеке, расположенном более удаленно от берега моря (скважина № 5, расстояние от уреза воды – 710 м), минерализация грунтовых вод существенно превышает нижнюю границу соленых вод и составляла 24,2 г/л (август 2017 г.), что существенно снизило биопродуктивность посевов подсолнечника в данном чеке и хорошо детектировалось как вегетационными, так и специализированными индексами.

Скважина № 7 расположена на поле, на котором в 2017 г. выращивался озимый рапс (предшественник – пар). Несмотря на высокую минерализацию грунтовых вод (16,1 г/л), косвенные методы мониторинга не показали отличия данного участка от поля в целом.

Для выявления основных действующих факторов и оценки динамики развития деградационных процессов в зоне риска на ранее орошаемых рисовых техногенных системах и разработки мероприятий по снижению уровня их воздействия на плодородие почв и эффективность ведения сельскохозяйственного производства на этих землях необходимо продолжить и углубить исследования с задействованием как информации наземных мониторинговых наблюдений производственных организаций, так и сведений исследовательских экспедиций и материалов обработки данных ДЗЗ.

Выводы. Проведенные в рамках работы исследования показали, что на четвертый год после прекращения водоподачи на рисовые техногенные системы Крыма (2014–2017 гг.) наблюдаются отдельные очаги деградационных почвенных процессов с существенным снижением уровня продуктивности сельскохозяйственных культур.

При этом косвенные индексы показывают, что эти процессы на некоторых участках детектируются

уже с 2015 г. Уровень снижения биопродуктивности позволяет выявить такие участки с задействованием как чисто вегетационных спутниковых индексов (NDVI, SAVI, NDVI Green), так и специализированных (NDMI, CRSI).

Использованные в работе методы на текущем этапе исследований не показали прямой зависимости между близостью границ полей к берегу моря, глубиной залегания грунтовых вод и интенсивностью проявления деградационных процессов.

Выращивание в зоне риска (отметки поверхности земли около 3 м и менее, близость к урезу морского побережья) сельскохозяйственных культур с высоким уровнем водопотребления и глубокой корневой системой (например, подсолнечника) может провоцировать ускорение процесса возврата засоления на бывших рисовых техногенных системах, построенных на ранее исходно засоленных землях.

Применение только инструментария ДЗЗ на первичном этапе диагностики мест локализации границ деградационных процессов не может быть оправданным ввиду влияния на оценочные показатели типа выращиваемой сельскохозяйственной культуры, а также ротации севооборота, включая использование паровых полей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования, науки и молодежи Республики Крым в рамках научного проекта № 16-44-910779 p_a.

Литература

1. Хитров Н. Б., Роговнева Л. В., Добрицкая Е. Ю., Дунаева Е. А., Кириленко Н. Г., Попович В. Ф. Солевое состояние рисовой системы севера Крыма после прекращения подачи воды // Таврический вестник аграрной науки. 2016. № 3. С. 140–154.
2. Попович В. Ф. Система мониторинга почвенного плодородия, режима и минерализации грунтовых вод на бывших рисовых техногенных системах в Крыму // Таврический вестник аграрной науки. 2017. № 2. С. 133–144.
3. Хитров Н. Б., Роговнева Л. В., Дунаева Е. А., Попович В. Ф., Паштецкий В. С., Клименко О. Е. Постирригационное состояние пахотных почв степного Крыма // Таврический вестник аграрной науки. 2016. № 1. С. 91–110.
4. 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 // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2014. Вып. 74. С. 49–65.
5. 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. № 2. P. 373–385. URL : <http://dx.doi.org/10.4236/ars.2013.24040> (дата обращения: 05.12.2017).
6. Elhag M., Bahrawi J.A. Soil salinity mapping and hydrological drought indices assessment in arid environments based on remote sensing techniques // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2017. № 6. P. 149–158. URL : <https://www.geosci-instrum-method-data-syst.net/6/149/2017/gi-6-149-2017.pdf> (дата обращения: 05.12.2017).
7. Ivushkin K., Bartholomeus H., Bregt A. K., Pulatov A. Satellite thermography for soil salinity assessment of cropped areas in Uzbekistan // Land Degrad. Develop. 2017. № 28. P. 870–877. URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.2670/pdf> (дата обращения: 06.12.2017).
8. Методология обработки данных SRTM // SRTM Data Processing Methodology. URL : <http://srtm.csi.cgiar.org/SRTMdataProcessingMethodology.asp> (дата обращения: 08.01.2018).
9. Landsat Spectral Indices Product Guide. Version 3.6. 2017. 31 p. // URL : https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/si_product_guide.pdf (дата обращения: 04.12.2017).
10. Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product // Remote Sensing of Environment. 2016. № 185. P. 46–56.

11. Sriwongsitanon N., Gao H., Savenije H. H. G., Maekan E., Saengsawang S., Thianpopirug S. Comparing the Normalized Difference Infrared Index (NDII) with root zone storage in a lumped conceptual model // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016. № 20. P. 3361–3377. doi:10.5194/hess-20-3361-2016.
12. Li W., Du Z., Ling F., Zhou D., Wang H., Gui Y., Sun B., Zhang X. A Comparison of Land Surface Water Mapping Using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI // *Remote Sensing*. 2013. № 5. P. 5530–5549. doi:10.3390/rs5115530.
13. Pastor-Guzman J., Atkinson P. M., Dash J., Rioja-Nieto R. Spatiotemporal Variation in Mangrove Chlorophyll Concentration Using Landsat 8 // *Remote sensing*. 2015. № 7. P. 14530–14558. doi: 10.3389/rs71114530.
14. Wu W. The generalized difference vegetation index (GDVI) for dryland characterization // *Remote Sens*. 2014. № 6 (2). P. 1211–1233. doi: 10.3390/rs6021211.
15. Scudiero E., Skaggs T. H., Corwin D. L. Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM+ canopy reflectance // *Remote Sens. Environ*. 2015. № 169. P. 335–343.
16. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М. : ИКИ РАН, 2016. 208 с.

References

1. Khitrov N. B., Rogovneva L. V., Dobritskaya E. Yu., Dunaeva E. A., Kirilenko N. G., Popovich V. F. Salt state of rice system at the North of Crimea after the cease offtake // *Taurida herald of agrarian science*. 2016. No. 3. P. 140–154.
2. Popovych V. F. Monitoring system of soil fertility, ground water mineralization and regime on previous rice man-caused systems in the Crimea // *Taurida herald of agrarian science*. 2017. No. 2. P. 133–144.
3. Khitrov N. B., Rogovneva L. V., Dunaieva Ie. A., Popovych V. F., Pashtetskiy V. S., Klimenko O. E. Post-irrigated state of arable soils of steppe Crimea // *Taurida herald of agrarian science*. 2016. No. 1. P. 91–110.
4. Savin I. Yu., Otarov A., Zhogolev A. V., Ibraeva M. A., Duisekov S. Long-term changes in the area of saline soils recognized by Landsat images in Shauldersk irrigated massive // *Bulletin of soil inst. named V. V. Dokuchaev*. 2014. Is. 74. P. 49–65.
5. 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. No. 2. P. 373–385. URL : <http://dx.doi.org/10.4236/ars.2013.24040> (reference date: 05.12.2017).
6. Elhag M., Bahrawi J.A. Soil salinity mapping and hydrological drought indices assessment in arid environments based on remote sensing techniques // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst*. 2017. No. 6. P. 149–158. URL : <https://www.geosci-instrum-method-data-syst.net/6/149/2017/gi-6-149-2017.pdf> (reference date: 05.12.2017).
7. Ivushkin K., Bartholomeus H., Bregt A. K., Pulatov A. Satellite thermography for soil salinity assessment of cropped areas in Uzbekistan // *Land Degrad. Develop*. 2017. No. 28. P. 870–877. URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ldr.2670/pdf> (reference date: 06.12.2017).
8. SRTM Data Processing Methodology // URL : <http://srtm.csi.cgiar.org/SRTMdataProcessingMethodology.asp> (reference date: 08.01.2018).
9. Landsat Spectral Indices Product Guide. Version 3.6. 2017. 31 p. // URL : https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/si_product_guide.pdf (reference date: 04.12.2017).
10. Vermote E., Justice C., Claverie M., Franch B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product // *Remote Sensing of Environment*. 2016. No. 185. P. 46–56.
11. Sriwongsitanon N., Gao H., Savenije H. H. G., Maekan E., Saengsawang S., Thianpopirug S. Comparing the Normalized Difference Infrared Index (NDII) with root zone storage in a lumped conceptual model // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016. No. 20. P. 3361–3377. doi:10.5194/hess-20-3361-2016.
12. Li W., Du Z., Ling F., Zhou D., Wang H., Gui Y., Sun B., Zhang X. A Comparison of Land Surface Water Mapping Using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ and ALI // *Remote Sensing*. 2013. No. 5. P. 5530–5549. doi:10.3390/rs5115530.
13. Pastor-Guzman J., Atkinson P. M., Dash J., Rioja-Nieto R. Spatiotemporal Variation in Mangrove Chlorophyll Concentration Using Landsat 8 // *Remote sensing*. 2015. No. 7. P. 14530–14558. doi: 10.3389/rs71114530.
14. Wu W. The generalized difference vegetation index (GDVI) for dryland characterization // *Remote Sens*. 2014. No. 6 (2). P. 1211–1233. doi: 10.3390/rs6021211.
15. Scudiero E., Skaggs T. H., Corwin D. L. Regional-scale soil salinity assessment using Landsat ETM+ canopy reflectance // *Remote Sens. Environ*. 2015. No. 169. P. 335–343.
16. Bartalev S., Egorov V., Zharko V., Loupian E., Plotnikov D., Khvostikov S., Shabanov N. Land cover mapping over Russia using Earth observation data. М. : Russian Academy of Sciences, Space Research Institute, 2016. 208 p.