Оценка динамики аридных экосистем на основе временных рядов космических снимков

Р. Харазми¹, Е.А. Паниди¹, М. Каркон Варносфадерани²

¹Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199178, Россия E-mails: r.kharazmi@mail.ru, panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru ²Государственный университет по землеустройству, Москва, 105064, Россия E-mail: mk.iut66@gmail.com

Пространственно-временной анализ динамики ландшафтов в регионах с засушливым климатом имеет важное значение для понимания основных угроз, возникающих в аридных экосистемах. В настоящем исследовании рассматривается применение мультиспектральных снимков Landsat 5 и Landsat 8 для мониторинга изменений типов земель на территории водно-болотных угодий Хамун в бассейне Систан. Для выявления изменений на исследуемой территории применена контролируемая классификация снимков методом максимального правдоподобия. Для оценки изменения площади различных типов земель использованы комбинационные таблицы. Данные, представленные в таблицах, подготовлены путем попарного сравнения масок основных типов земель, полученных на четыре временных среза в период с 1992 г. по 2015 г. Выявлено, что основные изменения в этом динамично развивающемся регионе состоят в преобразовании порядка 54% территории водных объектов в пустынные территории и пастбища в период с 1992 г. по 2015 г. Эти изменения связаны в основном с тем, что реки, питающие водно-болотный массив, не приносят достаточного количества воды. Полученные результаты подчёркивают важность непрерывного мониторинга происходящих в экосистемах аридных регионов изменений. Данный мониторинг позволяет своевременно выявлять критические изменения и оперативно вносить коррективы в систему управления землепользованием.

Ключевые слова: водно-болотные угодья Хамун, бассейн Систан, река Гильменд, комбинационные таблицы, мультиспектральные снимки

Одобрена к печати: 15.08.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-214-223

Введение

Космические мультиспектральные снимки, получаемые в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, обладают высокой информативностью, облегчающей решение задач ресурсно-экологического мониторинга (Каркон и др., 2016). В свою очередь, результаты автоматизированного дешифрирования разновременных снимков и их совместного пространственного анализа являются актуальным источником информации при мониторинге территорий с напряженной экологической ситуацией и построении прогноза развития происходящих на них процессов (Харазми, Чабан, 2015).

Целью настоящего исследования стало обнаружение существующих тенденций изменения в типах земель на территории водно-болотных угодий Хамун бассейна Систан, которые расположены на востоке Ирана и в западной части Афганистана, по материалам космических съёмок. В данной работе для оценки тенденций изменения на изучаемой территории было выполнено дешифрирование снимков, полученных с аппаратов Landsat. Для классификации изображений использован алгоритм контролируемой классификации методом максимального правдоподобия, а для оценки тенденций изменения построены комбинационные таблицы, которые демонстрируют соотношение площадей различных типов земель на изучаемой территории.

Характеристика территории исследования

Область исследования располагается между 30° 20' и 32° 00' с.ш. и 61° 00' и 62° 10' в.д. и имеет площадь порядка 595 400 га. Указанный регион покрывает часть бассейна Систан (*puc. 1*) на границе Ирана и Афганистана и является крайне засушливым. Годовое количество осадков в бассейне Систан составляет около 50 мм. В подобных условиях полноценная жизнедеятельность возможна только тогда, когда для водообеспечения региона доступны другие, «внешние», источники (Харазми, Чабан, 2015). Таким источником в данном случае является река Гильменд, главная река в данном регионе, приносящая талую воду с гор Гиндукуш, находящихся на востоке Афганистана (Харазми, Чабан, 2015; History..., 2006). Кроме того, три малых реки – Хаш, Фарах и Арашкан, которые собирают воду с западной части Гиндукуша, также значительно способствуют водообеспечению бассейна. В ситуациях, когда в связи с погодными и климатическими причинами эти реки не приносят достаточного количества воды, в регионе происходят продолжительные засухи.



Рис. 1. Географическое положение водно-болотных угодий Хамун в бассейне Систан

Одним из основных факторов, влияющих на погодные условия в регионе, являются сильные 120-дневные ветры, благодаря которым Систан считается одним из самых ветреных аридных районов в мире. Эти ветры дуют непрерывно весной и летом, а также непродолжительное время в зимний период, и оказывают существенное влияние на ландшафты и жизнь местных жителей (Харазми, Чабан, 2015; Rashki et al., 2013).

Водные объекты весьма обширны по площади, но не глубоки и характеризуются высокой внутригодовой динамикой, вплоть до полного пересыхания. Средняя глубина даже при самых высоких уровнях воды не превосходит 3 м. Обширные покрытые водой территории с тростниковыми зарослями оказывают положительное влияние на местный климат, интенсивное испарение уменьшает жару и повышает влажность воздуха (Харазми, Чабан, 2015; Rashki et al., 2013).

Ежегодные изменения площади водной поверхности оз. Хамун в течение 1985–2005 гг. могут быть разделены на четыре периода (History..., 2006):

1. Период низкой воды (1985–1988 гг.) – озера высыхали или существенно уменьшались почти каждый год при наличии некоторого притока воды ежегодно;

2. Период высокой воды (1989–1993 гг.) – значительный приток воды, объём воды сократился лишь по сравнению с максимальными уровнями предыдущих периодов;

3. Период средней воды (1994–1999 гг.) – баланс притока и оттока, достаточно высокий объем воды каждый год;

4. Сухой период (2000–2004 гг.) – приток прекратился, последовала катастрофическая засуха.

В конце четвёртого периода, в результате наводнения в 2005 г., произошёл значительный приток воды. В 2006–2009 гг. баланс притока и оттока сохранял достаточно большой объем воды (Rashki et al., 2013), а в 2009–2013 гг. объем воды последовательно сократился (Sharifikia, 2013).

В соответствии с такой динамикой в настоящем исследовании для анализа выбраны четыре временных среза в течение последних 23 лет:

1. период высокой воды – 1992 г.;

2. сухой период – 2000 г.;

3. период баланса – 2008 г.;

4. время сбора наземных данных для выделения основных типов земель, присутствующих на территории – 2015 г.

Обработка исходных данных

На основе данных Landsat за соответствующие годы (*табл. 1*), проанализированы актуальные тенденции изменения типов земель на всей территории водно-болотных угодий Хамун (территория делится на водно-болотные угодья Хамун Гильменд, Хамун Сабари и Хамун Пузак), существующие в последние годы.

Сенсор	Позиции сцен (Path/Row)	Даты съёмки
Landsat TM	157/38, 157/39	14 апреля 1992 г.
Landsat TM	157/38, 157/39	04 апреля 2000 г.
Landsat TM	157/38, 157/39	26 апреля 2008 г.
Landsat OLI	157/38, 157/39	30 апреля 2015 г.

Таблица	1.	Исходные	данные
---------	----	----------	--------

Все использованные снимки получены в апреле (по завершении периода активного роста растительности), то есть сопоставимы по сезонным характеристикам. Для обработки исходных снимков использованы ERDAS Imagine 2014 и ENVI 5.1. В целях контроля геометрической корректности и обеспечения гарантированной сопоставимости изображений была произведена их пространственная привязка (методом «изображение к изображению») по 21 опорной точке. Средняя квадратическая ошибка привязки на опорных точках составила от 0,3 до 0,5 пикселей. Радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция снимков выполнены в ENVI с помощью модуля FLAASH.

Автоматизированная классификация мультиспектральных снимков выполнена в ERDAS Imagine. Классификация типов земель выполнена методом максимального правдоподобия, в основе которого лежит понятие функции правдоподобия выборки (Чабан, 2004; Чандра, Гош, 2008).

Алгоритм был параметризован на основе тестовых участков основных типов земель (*табл. 2*), которые выделены с помощью данных наземных наблюдений, проведённых в 2015 году, и спектральных образов, зафиксированных на снимках (*puc.* 2).

Типы земель	Описание
Вода	Территории водных объектов (ВО)
Сухое дно	Территории пересохших ВО, после выпаривания осталась соль
Растительность	Пастбища и территории, покрытие растительностью
Пустоши	Территории, лишённые растительности
Обводнённая растительность	Растительность на обводнённых территориях, преимущественно тростник

Таблица 2. Схема классификации земельного покрова



Рис. 2. Спектральные профили основных тематических классов на обследуемой территории

Анализ результатов

Достоверность оценок изменений, произошедших на исследуемой территории, в данном случае зависит от надежности классификации изображений (Yuan et al., 2005). Для обеспечения единого подхода к оценке точности классификации в качестве тестовых участков выбраны участки, относящиеся к данному классу на всех четырех снимках, на которых тип земель был определён дополнительно по результатам полевого обследования в 2015 году. Для каждого класса объектов тестовые участки были разделены на две группы: обучающие и контрольные. По результатам классификации, полученным на контрольных участках, составлены матрицы ошибок классификации и рассчитаны общая точность и коэффициент Каппа.

Для снимков за 1992, 2000, 2008 и 2015 годы были получены значения общей точности 92,8%, 96,7%, 92,6%, и 91,7% и коэффициента Каппа 0,89, 0,89, 0,87 и 0,88 соответственно.

Анализ результатов классификации показывает, что протяжённый засушливый период в 1992–2000 годах (*puc. 3*) в целом привёл к значительному снижению площадей водных объектов и обводнённых территорий. В этот период годовое количество осадков уменьшалось на 70 процентов (Харазми, Чабан, 2015; History..., 2006). Однако в течение 2005 г. в результате выпадения большого количества осадков произошли «перезарядка» и частичное восстановление водно-болотных угодий (HISTORY..., 2006). В 2008 г. по сравнению с 2000 г. заметно увеличились площади, покрытые растительностью и водой, но площадь водных объектов стала значительно меньше, чем в 1992 г. (*puc. 3*).

Вместе с тем в течение следующих двух лет (2006–2008 гг.) произошло снижение притока воды, главным образом из-за сокращения количества осадков, в бассейне реки Гильменд (*рис. 4*). Замещение пустошей растительностью в 2008 г. и уменьшение площади растительного покрова в 2015 г. говорит о том, что некоторые участки в течение данного периода времени увлажнялись, но затем опять осушились. В 2015 г. также наблюдается значительное уменьшение площади водных объектов в сравнении с 2008 г.

Для характеристики изменений в типах земель на исследуемой территории использовано послеклассификационное сравнение (ПКС). ПКС часто используется для сравнения данных из разных источников либо данных за разные даты. Этот подход позволяет зафиксировать изменения, произошедшие за некоторый период и проявившиеся в преобразовании одних типов земель в другие. Изменения идентифицируются путем попиксельного сравнения независимо классифицированных изображений, полученных в различное время. Результаты сравнения могут быть представлены в виде комбинационных таблиц (*maбл. 3*), которые позволяют отразить количественную оценку произошедших изменений. Данные, представленные в таблицах, получены путем наложения масок классов каждого временного среза на маски последующих временных срезов. Недиагональные значения в таблицах отражают смену типов земель.



Рис. 3. Результаты классификации типов земель



Рис. 4. Приток воды из реки Гильменд в бассейн Систан в мил. куб. м (А) и годовое количество осадков (мм) в бассейне Систан с 1976 г. по 2009 г. (Б) (Sharifikia, 2013)

1992-2000 гг.	Обводн. раст.	Вода	Пусто- ши	Сухое дно	Pacm.	Итог 1992 г.	Потеря
Обводн. раст.	0,00	0,00	1,50	3,16	1,52	6,16	6,16
Вода	1,16	3,24	51,15	1,88	6,19	63,60	60,37
Пустоши	0,00	0,00	22,00	1,28	1,00	24,37	2,37
Сухое дно	0,00	0,00	5,52	0,29	0,06	5,87	5,52
Раст.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Итог 2000	1,16	3,24	80,17	6,61	8,77	100	74,42
Прирост	1,16	0,00	58,17	6,32	8,77	74,42	
2000–2008 гг.	Обводн. раст.	Вода	Пусто- ши	Сухое дно	Pacm.	Итог 2000 г.	Потеря
Обводн. раст.	0,00	1,11	0,03	0,00	0,01	1,16	1,16
Вода	0,00	3,24	0,00	0,00	0,00	3,24	0,00
Пустоши	0,85	9,24	47,14	7,70	15,27	80,17	33,03
Сухое дно	1,70	0,21	1,74	0,20	2,75	6,61	6,41
Раст.	0,94	0,40	1,70	0,09	5,63	8,77	3,14
Итог 2008	3,49	14,2	50,61	7,99	23,65	100	44,36
Прирост	3,49	13,09	3,47	7,29	17,02	44,36	
I I I	,		2	,	/	,	
2008–2015 гг.	Обводн. раст.	Вода	Пусто- ши	Сухое дно	Pacm.	Итог 2008 г.	Потеря
2008–2015 гг. Обводн. раст.	Обводн. раст. 1,04	Вода 0,01	<i>Пусто- ши</i> 0,44	<i>Сухое дно</i> 0,00	<i>Pacm.</i> 2,00	Итог 2008 г. 3,49	Потеря 2,45
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода	Обводн. раст. 1,04 1,12	Boda 0,01 8,34	Пусто- ии 0,44 3,00	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00	Pacm. 2,00 0,72	Итог 2008 г. 3,49 14,2	Потеря 2,45 5,86
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59	<i>Boda</i> 0,01 8,34 0,27	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10	Pacm. 2,00 0,72 2,50	Итог 2008 г. 3,49 14,2 50,61	Потеря 2,45 5,86 14,46
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04	<i>Boda</i> 0,01 8,34 0,27 0,18	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15 2,16	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19	Итог 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст.	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33	Итог 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34 4,13	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82 9,63	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35 49,10	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81 22,32	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33 14,74	Итог 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65 100	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32 39,67
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015 Прирост	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34 4,13 3,09	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82 9,63 1,28	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35 49,10 12,95	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81 22,32 16,91	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33 14,74 5,41	<i>Итог</i> 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65 100 39,67	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32 39,67
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015 Прирост 1992–2015 гг.	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34 4,13 3,09 Обводн. раст.	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82 9,63 1,28 Boda	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35 49,10 12,95 Пусто- ии	Сухое дно 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81 22,32 16,91 Сухое дно	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33 14,74 5,41 Pacm.	Итог 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65 100 39,67 Итог 1992 г.	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32 39,67 Потеря
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015 Прирост 1992–2015 гг. Обводн. раст.	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34 4,13 3,09 Обводн. раст. 0,63	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82 9,63 1,28 Boda 0,00	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35 49,10 12,95 Пусто- ии 1,25	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81 22,32 16,91 <i>Сухое дно</i> 0,54	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33 14,74 5,41 Pacm. 3,73	<i>Итог</i> 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65 100 39,67 <i>Итог</i> 1992 г. 6,16	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32 39,67 Потеря 5,53
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015 Прирост 1992–2015 гг. Обводн. раст. Вода	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34 4,13 3,09 Обводн. раст. 0,63 3,32	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82 9,63 1,28 Boda 0,00 9,51	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35 49,10 12,95 Пусто- ии 1,25 28,73	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81 22,32 16,91 <i>Сухое дно</i> 0,54 12,86	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33 14,74 5,41 Pacm. 3,73 9,16	<i>Итог</i> 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65 100 39,67 <i>Итог</i> 1992 г. 6,16 63,60	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32 39,67 Потеря 5,53 54,07
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015 Прирост 1992–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34 4,13 3,09 Обводн. раст. 0,63 3,32 0,13	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82 9,63 1,28 Boda 0,00 9,51 0,00	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35 49,10 12,95 Пусто- ии 1,25 28,73 16,99	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81 22,32 16,91 <i>Сухое дно</i> 0,54 12,86 5,43	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33 14,74 5,41 Pacm. 3,73 9,16 1,80	<i>Итог</i> 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65 100 39,67 <i>Итог</i> 1992 г. 6,16 63,60 24,37	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32 39,67 Потеря 5,53 54,07 7,38
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015 Прирост 1992–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34 4,13 3,09 Обводн. раст. 0,63 3,32 0,13 0,00	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82 9,63 1,28 Boda 0,00 9,51 0,00 0,00	Пусто- ии 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35 49,10 12,95 Пусто- ии 1,25 28,73 16,99 2,27	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81 22,32 16,91 <i>Сухое дно</i> 0,54 12,86 5,43 3,50	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33 14,74 5,41 Pacm. 3,73 9,16 1,80 0,09	<i>Итог</i> 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65 100 39,67 <i>Итог</i> 1992 г. 6,16 63,60 24,37 5,87	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32 39,67 Потеря 5,53 54,07 7,38 2,37
2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015 Прирост 1992–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст.	Обводн. раст. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34 4,13 3,09 Обводн. раст. 0,63 3,32 0,13 0,00 0,00	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82 9,63 1,28 Boda 0,00 9,51 0,00 0,00 0,00	<i>Пусто- ии</i> 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35 49,10 12,95 <i>Пусто- ии</i> 1,25 28,73 16,99 2,27 0,00	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81 22,32 16,91 <i>Сухое дно</i> 0,54 12,86 5,43 3,50 0,00	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33 14,74 5,41 Pacm. 3,73 9,16 1,80 0,09 0,00	<i>Итог</i> 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65 100 39,67 <i>Итог</i> 1992 г. 6,16 63,60 24,37 5,87 0,00	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32 39,67 Потеря 5,53 54,07 7,38 2,37 0,00
2008–2015 гг. 2008–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015 Прирост 1992–2015 гг. Обводн. раст. Вода Пустоши Сухое дно Раст. Итог 2015	Обводн. pacm. 1,04 1,12 0,59 0,04 1,34 4,13 3,09 Обводн. pacm. 0,63 3,32 0,13 0,00 0,00 4,08	Boda 0,01 8,34 0,27 0,18 0,82 9,63 1,28 Boda 0,00 9,51 0,00 0,00 0,00 0,00 14,04	<i>Пусто- иии</i> 0,44 3,00 36,15 2,16 7,35 49,10 12,95 <i>Пусто- иии</i> 1,25 28,73 16,99 2,27 0,00 49,24	<i>Сухое дно</i> 0,00 1,00 11,10 5,41 4,81 22,32 16,91 <i>Сухое дно</i> 0,54 12,86 5,43 3,50 0,00 22,33	Pacm. 2,00 0,72 2,50 0,19 9,33 14,74 5,41 Pacm. 3,73 9,16 1,80 0,09 0,00 14,78	<i>Итог</i> 2008 г. 3,49 14,2 50,61 7,99 23,65 100 39,67 <i>Итог</i> 1992 г. 6,16 63,60 24,37 5,87 0,00 100	Потеря 2,45 5,86 14,46 2,58 14,32 39,67 Потеря 5,53 54,07 7,38 2,37 0,00 69,37

Таблица 3. Комбинационные таблицы, отображающие соотношение площадей (%) различных типов земель на исследуемой территории в 1992–2000, 2000–2010, 2010–2015 и 1992–2015 годах

В период с 1992 г. по 2015 г. площади водных объектов претерпели наибольшие потери (54,07 % от общей площади), а площади пустошей получили наибольший прирост (32,25 %). Указанная тенденция подтверждается и анализом динамики площади водных поверхностей на исследуемой территории, который был проведён дополнительно (*puc. 5*).

Комбинационные таблицы наглядно демонстрируют, что самым значительным видом смены типов земель в период с 1992 по 2015 годы являются преобразования территорий водных объектов (*puc. 6*).



Рис. 5. Площадь водных поверхностей на исследуемой территории (в процентах от общей площади территории) в апреле в 1992–2015 гг.



Рис. 6. Изменение (в процентах от общей площади) площадей типов земель на исследуемой территории в 1992–2015 гг.

Заключение

В рамках исследования рассмотрена общая динамика типов земель аридной экосистемы центра Иранского нагорья в 1992–2015 гг. Выполнена контролируемая классификация снимков с использованием алгоритма максимального правдоподобия. Для количественной оценки изменения типов земель использованы комбинационные таблицы. В качестве исследуемой территории выбраны земли водно-болотных угодий Хамун.

Попарное сравнение результатов классификации позволило выявить основные направления изменений в типах земель на исследуемой территории. За исследуемый период на территории произошли значительные изменения состава земель, резко возросла площадь пустошей (прирост около 30%) и значительно сократилась площадь водных объектов (потеря до 50%). В данной работе рассмотрены четыре временных среза, но полученные результаты демонстрируют существование общей тенденции увеличения засушливости на исследуемой территории.

Засушливые периоды являются частым явлением в бассейне Систан. Продолжительные засухи зафиксированы в 1998–2003 годах (History..., 2006), они серьёзно повлияли на социальные, экологические и экономические условия жизни бедных слоёв населения в регионе. Подобные засухи возникают главным образом из-за изменения климата, снижения количества осадков и как следствие снижения притока воды, приносимой реками. Важным фактором, влияющим на качество жизни населения, является и низкий уровень промышленно-экономического развития, в том числе сельского-хозяйства, в котором используются в основном устаревшие ресурсоёмкие методы и технологии. В связи с наличием подобного контекста засуха 1998-2003 гг. вызвала большое число экологических проблем, связанных с состоянием водных ресурсов и сельскохозяйственной деятельностью. Среди подобных проблем важнейшими стали участившиеся пыльные бури и угнетение популяций диких животных и рыбы. Эти проблемы могут возникать и усугубляться снова в связи с уязвимостью экосистемы на данной территории и проблемами в социальноэкономическом развитии.

Бассейн Систан является классическим примером экологического кризиса. В условиях разделения территории государственными границами данный кризис может быть решен только путем комплексного скоординированного трансграничного управления водными ресурсами. Усилия в данном случае должны быть сосредоточены на обеспечении единого понимания проблемы, а также на выработке общих целей управления. Для обеспечения задач управления следует использовать все методы, в том числе методы дистанционного мониторинга, которые позволяют обеспечить эффективное наблюдение и изучение сезонной и межгодовой динамики экосистем. Результаты обработки и анализа временных рядов космических снимков дают наглядную и репрезентативную оценку состояния и динамики экосистем.

Литература

3

^{1.} Каркон Варносфадерани М.М., Харазми Р.С., Шаповалов Д.А., Митрофанов Е.М. Оценка точности визуального дешифрирования растительного покрова на основе вегетационных индексов (на примере Загроса, западный Иран) // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. № 4. С. 90–93.

Харазми Р.С., Чабан Л.Н. Анализ динамики экосистем бассейна Систан по результатам автоматизирован-2 ной обработки космических мультиспектральных снимков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 4. С. 94–100. *Чабан Л.Н.* Теория и алгоритмы распознавание образов. Учебное пособие. М.: МИИГАиК, 2004. 70 с.

Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: 4. ЗАО «РИЦ «Техносфера», 2008. 208 с.
History of Environmental Change in the Sistan Basin Based on Satellite Image Analysis: 1976–2005. UNEP,

^{2006. 60} p.

- 6. Rashki A., Eriksson P.G., Rautenbach C.J. de W., Kaskaoutis D.G., Grote W., Dykstra J. Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran // Chemosphere. 2013. Vol. 90. P. 227-236.
- 7. Sharifikia M. Environmental challenges and drought hazard assessment of Hamoun Desert Lake in Sistan region, Iran, based on the time series of satellite imagery // Nat. Hazards. 2013. Vol. 65. P. 201-217.
- Yuan F., Sawaya K.E., Loeffelholz B., Bauer M.E. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 98. P. 317-328. DOI: 10.1016/j.rse.2005.08.006.

Assessment of dry land ecosystem dynamics based on time series of satellite images

R. Kharazmi¹, E.A. Panidi¹, M. Karkon Varnosfaderani²

¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg 199178, Russia *E-mails: r.kharazmi@mail.ru, panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru* ²Moscow State University of Land Management, Moscow 105064, Russia *E-mail: mk.iut66@gmail.com*

Spatiotemporal analysis of landscape dynamics in arid regions is very important for understanding the major threats that occur in arid ecosystems. The study deals with application of Landsat 5 and Landsat 8 multispectral satellite images to land type dynamics monitoring for the area of Hamoon Wetlands located in the Sistan Basin. The supervised maximum likelihood classification technique was applied to detect land type changes on the studied area. Cross-tabulation matrixes were used to assess the area change for different land types. The data presented in the matrixes were obtained by pairwise comparison of the masks, which were produced for four time slices (in 1992–2015) by classifying the basic land types. It is detected that main change in this region is consisted in replacement of approximately 54% of the water bodies area with desert areas and pastures in the period from 1992 to 2015. This change is related mainly to the regime of feeding rivers, which are not bringing enough water. The obtained results emphasize the importance of continuous monitoring of the ecosystem evolution in arid regions, which allows early detection of the significant change and quick adjustments of the land use management schema.

Keywords: Hamoon Wetlands, Sistan Basin, Helmand River, cross-tabulation matrix, multispectral imagery

Accepted: 15.08.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-214-223

References

- 1. Karkon Varnosfaderani M.M., Kharazmi R.S., Shapovalov D.A., Mitrofanov E.M., Otsenka tochnosti vizual'nogo deshifrirovaniya rastitel'novo pokrova na osnove vegetatsionnykh indeksov (na primere Zagrosa, zapadny Iran) (Accuracy ranking of plant cover visual photo interpretation based on vegetation indices (by example of the Zagros mountains, west Iran)), Izvestiya vuzov Geodeziya i aerofotos "emka, 2016, Vol. 4, pp. 90-93.
- Kharazmi R.S., Chaban L.N., Analiz dinamiki ekosistem basseina Sistan po rezul'tatam avtomatizirovannoi 2. obrabotki kosmicheskikh mul'tispektral'nykh snimkov (Analysis of dynamics of the Sistan Basin ecosystems using the results of automated processing of the multispectral satellite imagery), *Izvestiya vuzov. Geodeziya* i aerofotos "emka, 2015, Vol. 4, pp. 94-100.
- Chaban L.N., Teoriya i algoritmy raspoznavanie obrazov (Theory and algorithms of the pattern recognition), 3 Moscow: MIIGAiK, 2004, 70 p. Chandra A.M., Ghosh S.K., *Distantsionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy* (Remote
- 4. sensing and geographical information systems), Moscow: Tekhnosfera, 2008, 208 p.
- History of Environmental Change in the Sistan Basin Based on Satellite Image Analysis: 1976–2005, UNEP, 5. 2006, 60 p.
- Rashki A., Eriksson P.G., Rautenbach C.J.de W., Kaskaoutis D.G., Grote W., Dykstra J., Assessment of chemical 6 and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan Region, Iran, Chemosphere, 2013, Vol. 90,
- pp. 227–236. Sharifikia M., Environmental challenges and drought hazard assessment of Hamoun Desert Lake in Sistan region, 7. Iran, based on the time series of satellite imagery, *Nat. Hazards*, 2013, Vol. 65, pp. 201–217.
- Yuan F., Sawaya K.E., Loeffelholz B., Bauer M.E., Land cover classification and change analysis of the Twin 8 Cities (Minnesota) metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing, Remote Sensing of Environment, 2005, Vol. 98, pp. 317-328. DOI: 10.1016/j.rse.2005.08.006.