Оценка динамики аридных экосистем по результатам автоматизированной обработки серий мультиспектральных спутниковых снимков

Р. Харазми¹, Е.А. Паниди¹, Л.Н. Чабан²

¹Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199178, Россия E-mails: r.kharazmi@mail.ru, panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

²Московский государственный университет геодезии и картографии Москва, 105064, Россия E-mail: lusy@chaban.su

Выявление изменений на земной поверхности позволяет оценить пространственно-временные закономерности развития территорий и определить их количественные параметры. Настоящее исследование посвящено оценке сезонной динамики водно-болотных угодий Хамун, расположенных на территории бассейна Систан (дельта реки Гильменд на востоке Ирана и в западной части Афганистана). Динамика озера непосредственно зависит от водного режима питающих рек, которые вытекают из удаленных истоков. Климатические факторы и антропогенное воздействие сильно повлияли на динамику анализируемой территории. Авторами использованы мультиспектральные снимки Landsat, полученные в течение последних 30 лет. Для выявления изменений на исследуемой территории применена контролируемая классификация снимков методом максимального правдоподобия с отнесением типа земель к одной из четырех обобщённых категорий (водные поверхности, обводнённая растительность, растительность на суше и пустоши). В целях количественной оценки изменений типов земель изучена динамика площади данных категорий, в том числе с учётом календарных сезонов, за последние 30 лет. Полученные результаты показали, что оценки динамики типов земель, выполненные на основе данных, собранных в весенний и летний сезоны, демонстрируют более высокую сходимость, чем оценки на основе данных за весенний и осенний сезоны. Результаты общей (усреднённой за все сезоны) оценки демонстрируют, что в 2000-2004 гг. наблюдалось существенное сокращение площади растительного покрова и водных поверхностей. Кроме того, в результате сравнения данных за 1987, 2001 и последующие годы выявлено, что доля пустошей на исследуемой территории может существенно изменяться за счёт площадей водных объектов и обводненных территорий. Полученные результаты могут быть использованы при планировании мониторинга и исследовании изменений в природных экосистемах аридных регионов.

Ключевые слова: мультиспектральные снимки, река Гильменд, изменение типов земель, водно-болотные угодья Хамун, бассейн Систан

Одобрена к печати: 15.05.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-196-205

Ввеление

Значительная часть Ирана относится к аридным территориям, которые простираются от центральной части страны на восток и юго-восток и характеризуются малым годовым количеством осадков, скудным растительным покровом и низкой плотностью населения (Каркон Варносфадерани и др., 2016). В данных регионах практически отсутствуют постоянные водные объекты (реки и озёра), в связи с чем сельскохозяйственная деятельность локализуется, прежде всего, на тех территориях, где доступны грунтовые воды. Бассейн Систан, расположенный на востоке Ирана и в западной части Афганистана, является исключительной областью, которая, благодаря подаче воды из водно-болотных угодий Хамун и реки Гильменд, имеет достаточно высокую плотность населения и в которой представлены несколько видов сельскохозяйственной деятельности (Whithney, 2006). В последние годы экосистема озера существенно изменилась в связи с изменениями климата и деятельностью человека в данном регионе. Основной экологической проблемой региона является

неспособность рек в современных условиях донести достаточное количество воды. Кроме того, сильные флуктуации были и ранее характерны для естественного гидрологического цикла на данной территории. Начиная с 1975 года здесь произошла серия засух, что стало причиной снижения уровня воды (Харазми и др., 2016) и повлияло на сельское хозяйство, площади орошаемых угодий уменьшилась с 120000 га в 70-х гг. до 46000 га в 2005–2007 гг. (Van Beek et al., 2008).

Бассейн Систан, являясь нетипичной экосистемой и районом, важным с точки зрения жизнеобеспечения населения, имеет высокий потенциал как объект для изучения в разных направлениях. Однако лишь несколько исследований в данном районе известны из публикаций, большая часть из которых ориентирована на рассмотрение явления песчаных бурь (Ekhtesasi, Gohari, 2013; Rashki et al., 2012, 2015) и практически не затрагивает вопросы экологического и гидрологического характера.

Целью проведения дистанционного мониторинга в рамках настоящего исследования стало изучение сезонной динамики экосистем водно-болотных угодий Хамун и обнаружение существующих тенденций изменения типов земель путем обработки и анализа временных рядов космических снимков с учётом годовых гидрологических циклов. Для оценки тенденций изменения было выполнено дешифрирование снимков, полученных с космических аппаратов серии Landsat. Для анализа изображений использован алгоритм контролируемой классификации методом максимального правдоподобия (Чабан, 2004; Чандра, Гош, 2008), а для оценки тенденций изменения проанализирована динамика площадей различных типов земель за последние 30 лет, которая является количественной характеристикой изменений, происходящих на изучаемой территории.

Территория исследования

Систан находится в нижней части большого бессточного бассейна, в одном из самых засушливых регионов мира, и разделяется на три района (Vekerdy et al., 2006): верхняя равнина в дельте реки Гильменд, которая в основном осушена и занята сельхозугодьями; водно-болотные угодья Хамун на нижней равнине дельты; гиперминерализованное озеро Гауди-зирра в нижней части бассейна, которое собирает избыток воды с водно-болотных угодий через реку Шила (рис. 1а).

Область исследования простирается от $30^{\circ}20'$ до $32^{\circ}00'$ с. ш. и от $61^{\circ}00'$ до $62^{\circ}10'$ в. д. и имеет площадь порядка 595400 га, включая часть бассейна Систан ($puc.\ 1$) на границе Ирана и Афганистана.

Годовое количество осадков в бассейне Систан составляет около 50 мм. Вследствие этого полноценные жизнедеятельность и хозяйственная деятельность возможны только при условии доступности внешних источников воды (Харазми, Чабан, 2015; Харазми и др., 2016). В случае бассейна Систан таким источником является река Гильменд, приносящая талую воду с гор Гиндукуш на востоке Афганистана (Харазми, Чабан, 2015; Vekerdy

et al., 2006). Также три малых пересыхающих реки – Хаш, Фарах и Арашкан собирают воду с западной части Гиндукуша в дождливый сезон, значительно способствуя пополнению бассейна. Обширные покрытые водой территории с тростниковыми зарослями оказывают положительное влияние на местный климат (Харазми, Чабан, 2015; Rashki et al., 2013) Водные объекты при этом имеют малую глубину, а также характеризуются высокой внутригодовой динамикой, вплоть до полного пересыхания. Средняя глубина, даже при самых высоких уровнях воды, не превосходит 3 м. Продолжительные засухи возможны, когда реки не приносят достаточного количества воды, например, в связи с погодными условиями.

Для лучшего контроля за распределением воды, поступающей на орошаемую равнину Систан, на иранской стороне, непосредственно после развилки Гильменд, где река Гильменд разделяется на Систан и Париан (*puc. 1a*), в 1980 г. было построено водохранилище Чах-ниме. Площадь водохранилища варьируется от 2500 га до 13100 га в зависимости от притока воды из реки Гильменд, объём достигает 1530 млн м³ (Vekerdy et al., 2006), что делает Чах-ниме вторым по значению водохранилищем в бассейне Гильменд.

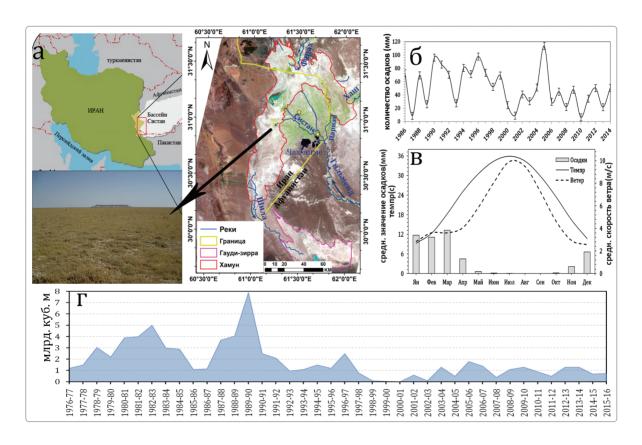


Рис. 1. Географическое положение водно-болотных угодий Хамун в бассейне Систан (а); среднегодовое количество осадков (б); средние значения климатических факторов по месяцам с 1987 по 2014 год согласно метеорологическим станциям Заболь и Зехак (желтые точки на рис. а) (в); объем притока из реки Гильменд (г)

Материалы и методы

Для выявления тенденций изменения типов земель в регионе были определены три базовых типа земель:

- 1) территории водных объектов;
- 2) территории, покрытие растительностью;
- 3) территории, лишённые растительности.

Для выявления особенностей динамики анализ данных проводился раздельно по трём сезонам года:

- 1. Весна с марта по май (период активной вегетации в регионе, растительность занимает значительную часть территории).
- 2. Лето с июня по август (из-за высокой температуры и сильных ветров происходит интенсивное испарение, которое достигает 5000 мм (Vekerdy et al., 2006)).
 - 3. Осень с сентября по ноябрь (проявляется итог годового цикла).

При подборе исходных снимков проанализирован весь доступный архив данных программы Landsat за последний 30 лет (www.earthexplorer.usgs.gov) и подобраны пригодные для исследования серии снимков Landsat 5, 7 и 8 с учётом вышеуказанных сезонов (*табл. 1*). В отдельных случаях (за отдельные годы) пригодные снимки отсутствовали.

При анализе использованы все аналогичные каналы в видимом, ближнем ИК и коротковолновом ИК диапазонах (каналы 1–5 и 7 Landsat 5 и Landsat 7, каналы 1–6 Landsat 8).

Чтобы перекрыть исследуемую территорию, для каждого периода были построены мозаики из двух изображений. При обработке снимков использованы ERDAS Imagine 2014 и ENVI 5.1. Радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция снимков выполнены в ENVI с помощью модуля FLAASH (Харазми и др., 2016). Автоматизированная классификация типов земель выполнена в ERDAS Imagine методом максимального правдоподобия, в основе которого лежит понятие функции правдоподобия выборки (Чабан, 2004; Чандра, Гош, 2008). Для данной территории впервые по единой методике были обработаны мультиспектральные снимки, полученные в течение тридцати лет.

гаолица т. перечень использованных снимков								
Съёмочная аппаратура	Номера сцен (Path/Row)	Год	Дата съёмки, весенний сезон	Дата съёмки, летний сезон	Дата съёмки, осенний сезон			
Landsat-TM	157/38, 157/39	1987	3 мая	6 июля	24 сентября			
Landsat-TM	157/38, 157/39	1988	_	22 июня	_			
Landsat-TM	157/38, 157/39	1989	24 мая	1 июня	13 сентября			
Landsat-TM	157/38, 157/39	1990	25 апреля	_	5 декабря			
Landsat-TM	157/38, 157/39	1991	30 мая	18 августа	6 ноября			
Landsat-TM	157/38, 157/39	1992	14 апреля	19 июля	24 ноября			

Таблица 1. Перечень использованных снимков

Таблица 1. Продолжение

Съёмочная аппаратура	Номера сцен (Path/Row)	Год	Дата съёмки, весенний сезон	Дата съёмки, летний сезон	Дата съёмки, осенний сезон
Landsat-TM	157/38, 157/39	1993	03 май	20 июня	24сентября
Landsat-TM	157/38, 157/39	1994	_	25 июля	27 сентября
Landsat-TM	157/38, 157/39	1995	_	_	1 ноября
Landsat-TM	157/38, 157/39	1996	27 мая	30 июля	16 сентября
Landsat-TM	157/38, 157/39	1998	15 апреля	18 июня	24 октября
Landsat-TM и ETM+	157/38, 157/39	1999	_	16 июля (ТМ)	27 октября (ETM+)
Landsat-TM	157/38, 157/39	2000	4 апреля	25 июля	11 сентября
Landsat-ETM+	157/38, 157/39	2001	30 марта	10 июня	6 сентября
Landsat-ETM+	157/38, 157/39	2002	18 апреля	8 августа	11 октября
Landsat-ETM+*	157/38, 157/39	2003	21 апреля	26 июля	14 октября
Landsat-ETM+*	157/38, 157/39	2004	7 апреля	10 июня	16 октября
Landsat-ETM+*	157/38, 157/39	2005	10 апреля	13 июня	17 сентября
Landsat-ETM+*	157/38, 157/39	2006	29 апреля	16 июня	6 октября
Landsat-ETM+*	157/38, 157/39	2007	16 апреля	5 июля	25 октября
Landsat-TM	157/38, 157/39	2008	26 апреля	15 июля	19 октября
Landsat-TM	157/38, 157/39	2009	15 мая	2 июля	6 октября
Landsat-TM	157/38, 157/39	2010	18 мая	19 июля	26 ноября
Landsat-TM и ETM+*	157/38, 157/39	2011	3 апреля (ТМ)	1 августа (ETM+)	4 октября (ETM+)
Landsat-ETM+*	157/38, 157/39	2012	29 апреля	19 августа	6 октября
Landsat-OLI	157/38, 157/39	2013	24 апреля	13 июля	1 октября
Landsat-OLI	157/38, 157/39	2014	27 апреля	30 июня	18 сентября
Landsat-OLI	157/38, 157/39	2015	30 апреля	19 июля	7 октября
Landsat-OLI	157/38, 157/39	2016	18 мая	21 июля	23 сентября

^{*} снимки Landsat 7 с пропущенными линиями сканирования в результате сбоя, произошедшего в 2003 году

Для получения общей характеристики типов земель, представленных на исследуемой территории, и извлечения их спектральных характеристик на тестовых участках была выполнена неконтролируемая классификация всей территории бассейна Систан – дважды:

на основе снимков за июнь 2014 г. и июль 2015 г. Анализ результатов показал, что пустоши, травянистая растительность и водные поверхности являются ключевыми характерными типами земель в данном регионе, хорошо различимыми по спектральной отражательной способности. В процессе анализа класс растительности был разделен на два класса: обводненная растительность и растительность на суше, которые различались по своим спектральным характеристикам. Для контроля точности классификации были использованы 70 контрольных точек, которые верифицировались по наземным наблюдениям (рис. 2).

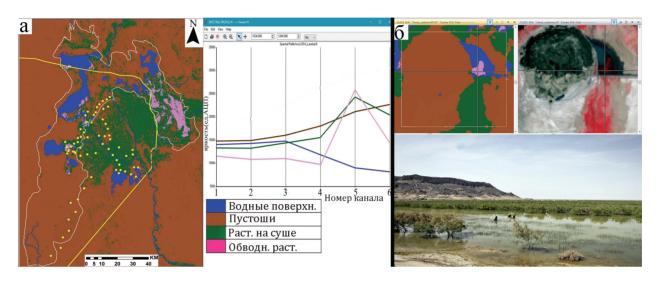


Рис. 2. Результат неконтролируемой классификации, жёлтые точки – контрольные точки, использованные при оценке точности классификации (а); контроль точности неконтролируемой классификации по наземным данным в июле 2014 г.

Для дешифрирования классов были использованы спектральные профили. Алгоритм был параметризован на основе данных тестовых участков для основных типов земель, которые были сформированы путём выборочного визуального дешифрирования исходных снимков (Каркон Варносфадерани и др., 2016; Харазми и др., 2016) и спектральных профилей, зафиксированных на снимках.

Как отмечено в *табл. 1*, часть снимков Landsat 7 имела пропущенные линии сканирования (чёрные полосы на изображении). Эти не классифицируемые области занимали менее 10% от дешифрируемой площади. При этом, если внутри или рядом с некоторым классом присутствуют пиксели с другими спектральными значениями и количество этих пикселей составляет менее 10% от площади данного класса, то эти пиксели могут быть объединены с данным классом (Zobeiri, Majd, 2011), что и выполнялось в процессе классификации. Для этого было выполнено сглаживание по преобладающему классу в окрестности каждого пикселя (Харазми, Чабан, 2015).

При проведении классификации тестовые участки были разделены на обучающие и контрольные, что позволило составить матрицы ошибок классификации и рассчитать общую точность (варьировалась от 91,8 % до 97,1 %) и коэффициент Каппа (от 0,85 до 0,94).

Тенденции изменения типов земель

Оценка изменений типов земель, произошедших за 30-летний период, дает возможность выявить закономерности данных изменений на исследуемой территории и прогнозировать дальнейшую динамику. В связи с различающимся влиянием сезонов съёмки на дешифрируемые площади типов земель (см. раздел «Материалы и методы») оценка площадей, занимаемых различными типами, выполнялась раздельно по сезонам.

Полученные результаты демонстрируют, что между данными за весенний и летний сезоны существует более высокая сходимость, чем между данными за весенний и осенний сезоны. Вероятно, межсезонные различия вызваны интенсивным испарением и песчаными бурями летом. Из-за наносов песка озера мелеют и испарение на мелководье идет быстрее. Дополнительно площади дешифрируемых классов за три сезона были осреднены по годам. Для демонстрации происходящих изменений классы «водные поверхности» и «обводнённая растительность» были объединены в класс «обводнённые территории с растительностью» (рис. 3).

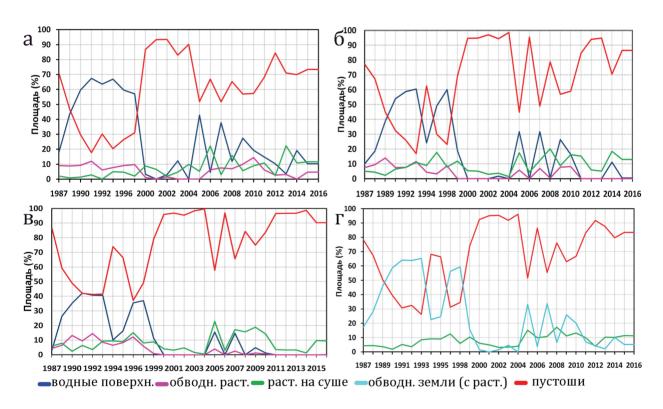


Рис. 3. Изменение (в процентах от общей площади) площадей типов земель на исследуемой территории в 1987–2016 гг. по данным за весенний (а), летний (б) и осенний (в) сезоны, а также среднегодовая интегральная оценка изменения по трем сезонам (г)

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что типы земель и виды землепользования в районе исследования значительно изменились за последние 30 лет. Очевидно сокращение площади растительности и водных объектов и увеличение площади пустошей. Растительность на суше при этом не очень сильно реагирует на изменения в притоке воды. Кроме того, доля пустошей (в соответствии с данными за 1987 год, после засухи 2001 года и за последние годы) может существенно изменяться за счёт изменений площади обводненной территории, что хорошо видно по данным за осенний сезон. Также хорошо видна динамика изменений: в 2000–2004 гг. наблюдалось существенное сокращение площади растительности и водных объектов, в последние годы водные зеркала существовали не круглогодично.

Обычно весной в результате привнесения паводковых вод площадь водных объектов и растительности увеличивается, а уменьшение притока летом, 120-дневные ветры и интенсивное испарение ведут пересыханию водно-болотных угодий (Whitney, 2006). Кроме того, запас воды в водохранилище Чах-ниме в объеме 1530 млн м³ (Vekerdy et al., 2006) также ведёт к недостаточному водоснабжению угодий в последние годы.

Заключение

В работе рассмотрена сезонная динамика аридной экосистемы центра Иранского нагорья в 1987—2016 гг. и отражены современные и исторические обстоятельства изменений в типах земель и землепользовании. Выполнена классификация земель на исследуемой территории (бассейн Систан). Для количественной оценки изменений типов земель оценены изменения площади ключевых типов за последние 30 лет. Сравнение оценок, полученных в различные сезоны года, позволило выявить основные направления изменений. Анализ результатов показывает, что данные Landsat могут эффективно использоваться для создания карт типов земель аридных экосистем при оценке их сезонной динамики.

В 1973 г. Иран и Афганистан подписали третье соглашение по делению вод реки Гильменд, согласно которому Афганистан предоставил возможность бесперебойно пропускать на иранскую территорию 22 м³ в сек. Иран за плату получил дополнительно 4 м³ в сек. среднегодового расхода (Окимбеков, 2013). Однако сезонные и межгодовые колебания притока воды в регионе не позволяют сформировать в бассейне устойчивую экосистему.

За последние годы спрос на воду реки Гильменд в Афганистане и Иране значительно вырос, что осложняет вопрос водопользования в афганской провинции Гильменд и иранском Систане. Как афганские, так и иранские приграничные районы ощущают острый дефицит поливной и питьевой воды. Афганистан нуждается в строительстве ирригационных сооружений. Решение экологических проблем района может быть найдено только в контексте трансграничного сотрудничества, но не для отдельно взятой страны.

Литература

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.

- Окимбеков У.В. Афганистан: проблемы совместного использования вод трансграничных рек // Азия и Африка сегодня. 2013. № 10, С. 39-43
- Харазми Р., Паниди Е.А., Каркон Варносфадерани М.М. Оценка динамики аридных экосистем на основе временных рядов космических снимков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. № 5. С. 214–223 *Харазми Р.С., Чабан Л.Н.* Анализ динамики экосистем бассейна Систан по результатам автоматизирован-
- ной обработки космических мультиспектральных снимков // Известия вузов, Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 4. C. 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.: ЗАО «РИЦ «Техносфера», 2008. 208 с.
- Ekhtesasi M.R., Gohari Z. Determining Area Affected by Dust Storms in Different Wind Speeds, Using Satellite Images (Case Study: Sistan Plain, Iran) // DESERT. Vol. 17. 2013. P. 193–202. Rashki A., Eriksson P.G., Rautenbach C.J. de W., Kaskaoutis D.G., Grote W., Dykstra J. Assessment of chemi-
- cal and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran // Chemosphere, 2013, Vol. 90.
- Rashki A., Kaskaoutis D.G., Francois P., Kosmopoulos P.G., Legrand M. Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas // Aeolian Research. Vol. 16. 2015. P. 35–48.
- 10. Rashki A., Kaskaoutis D.G., Rautenbach C.J. de W., Eriksson P.G., Qiang M., Gupta P. Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran // Aeolian Research. 2012. Vol. 5. P. 51–62.
- 11. *Van Beek E., Bozorgy B., Vekerdy Z., Meijer K.* Limits to agricultural growth in the Sistan Closed Inland Delta, Iran // Irrigation and Drainage Systems. 2008. Vol. 22. P. 131–143.
- 12. Vekerdy Z., Dost R., Reinink G., Partow H. History of environmental change in the Sistan Basin based on satellite
- image analysis: 1976–2005. UNEP. 2006. 60 p.

 13. Whitney J. W. Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghanistan. Prepared under the auspices of the U.S. Agency for International Development, 2006. 50 p.
- 14. Zobeiri M., Majd A.R. An introduction to remote sensing technology and its application in natural resources. University of Tehran, 2011. 313 p. (In Persian).

Assessment of arid ecosystems dynamics based on the results of automated processing of multispectral satellite imagery time series

R. Kharazmi¹, E.A. Panidi¹, L.N. Chaban²

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 Geodesy and Cartography, Moscow 105064, Russia E-mail: lusy@chaban.su

Detection of changes on the Earth's surface allows to assess spatiotemporal patterns of land evolution and to determine their quantitative parameters. This study is aimed on the assessment of seasonal dynamics of the Hamoun Wetlands located in the Sistan Basin (delta of the Helmand River, eastern part of Iran and western part of Afghanistan). The dynamics of the lake depends directly on water amounts in the rivers flowing from the remote sources. Climate and anthropogenic factors influence strongly the dynamics of the analyzed territory. The authors used multispectral Landsat imagery acquired during the past 30 years. The supervised maximum likelihood imagery classification algorithm was used to detect changes in the study area. Lands were classified into four generalized types (water surface, flooded vegetation, grasslands and bare land). Changes in areas of these types were studied in order to quantify changes of lands. The calendar seasons over the past 30 years were taken into account. Obtained results show that the estimates of land type dynamics based on data collected in spring and summer seasons demonstrate higher convergence than the estimates based on data collected in spring and autumn seasons. The results of the overall (averaged over all seasons) assessment show that there was a significant decrease in the areas of vegetation cover and water surfaces in 2000–2004. In addition, it was revealed (by comparing data for 1987, 2001 and subsequent years) that the area of wastelands in the region can increase significantly due to the decrease of water bodies and flooded areas. Obtained results can be used for planning monitoring campaigns and study of changes in natural ecosystems of arid regions.

Keywords: multispectral imagery, Helmand River, landcover change, Hamoun Wetlands, Sistan Basin

Accepted: 15.05.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-196-205

References

- 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.
- Okimbekov U.V., Afganistan: problemy sovmestnogo ispol'zovaniya vod transgranichnykh rek (Afghanistan: the problem of sharing water of transboundary rivers), *Aziya i Afrika segodnya*, 2013, No. 10, pp. 39–43. Kharazmi R., Panidi E.A., Karkon Varnosfaderani M., Evaluation of dynamics of the arid ecosystems using sat-
- ellite image time series, Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2016, No. 5,
- pp. 214–223. Kharazmi R.S., Chaban L.N., Analiz dinamiki ekosistem basseina Sistan po rezul'tatam avtomatizirovannoi 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). Moscow: MIIGAiK, 2004, 70 p.
- Chandra A.M., Ghosh S.K., Distantsionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy (Remote sensing and geographical information systems), Moscow: Tekhnosfera, 2008, 208 p.
- Ekhtesasi M.R., Gohari Z., Determining Area Affected by Dust Storms in Different Wind Speeds, Using Satellite Images (Case Study: Sistan Plain, Iran), *DESERT*, Vol. 17, 2013, pp. 193–202.
 Rashki A., Eriksson P.G., Rautenbach C.J. de W., Kaskaoutis D.G., Grote W., Dykstra J., Assessment of chem-
- ical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran, Chemosphere, 2013, Vol. 90,
- pp. 227–236. Rashki A., Kaskaoutis D.G., François P., Kosmopoulos P.G., Legrand M., Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas, Aeolian Research, Vol. 16, 2015, pp. 35–48.
- Rashki A., Kaskaoutis D.G., Rautenbach C.J. de W., Eriksson P.G., Qiang M., Gupta P., Dust storms and their
- Rasiki A., Raskadutis D.G., Ratterbach C.J. de W., Eriksson F.G., Qlang M., Gupta F., Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran, Aeolian Research, 2012, Vol. 5, pp. 51–62.
 Van Beek E., Bozorgy B., Vekerdy Z., Meijer K., Limits to agricultural growth in the Sistan Closed Inland Delta, Iran, Irrigation and Drainage Systems, 2008, Vol. 22, pp. 131–143.
 Vekerdy Z., Dost R., Reinink G., Partow H., History of environmental change in the Sistan Basin based on satellite image analysis: 1976-2005, UNEP, 2006, 60 p.
- 13. Whitney J.W., Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghanistan. Prepared under the auspices of the U.S. Agency for International development, 2006, 50 p.
- 14. Zobeiri M., Majd A.R., An introduction to remote sensing technology and its application in natural resources. University of Tehran, 2011, 313 p. (In Persian).