

УДК 528.88

Э. А. ТЕРЕХИН

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

**МЕТОДИКА ПОИСКА ЭФФЕКТИВНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ  
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ  
(НА ПРИМЕРЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ)**

*На примере водных объектов Белгородской области исследована эффективность улучшающих спектральных преобразований космических снимков для целей автоматизированного дешифрирования водных объектов. Сопоставлена точность картографирования водных объектов на основе исходного снимка и значений 14 спектральных индексов. Установлено, что применение преобразования Tasseled Cap позволяет наиболее детально исследовать спектральные свойства водных поверхностей. На основе результатов автоматизированного дешифрирования спутниковых снимков проанализировано изменение площадей водоемов Белгородской области с 1986 по 2011 г.*

Ключевые слова: водные объекты, спектральные индексы, автоматизированное дешифрирование, Белгородская область.

*A case study has been made of the water bodies in Belgorod oblast in investigating the efficiency of improving spectral conversions of space images for purposes of automated interpretation of water bodies. A comparison is made of the initial image-based mapping accuracy of water bodies with values of 14 spectral indices. It is found that the Tasseled Cap Transformation can be employed in order to investigate in the greatest detail the spectral properties of water surfaces. Changes in the areas of water bodies of Belgorod oblast have been analyzed for the time interval from 1986 to 2011 on the basis of results of automated interpretation of space images.*

Keywords: water bodies, spectral indices, automated interpretation, Belgorod oblast.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Белгородская область характеризуется сравнительно густой, разветвленной речной сетью и значительным количеством прудов (свыше 1100), хотя озер в области немного. Большинство прудов создано путем перегораживания земляными плотинами балок, лошин, ручьев и небольших рек. Пруды в основном используются для водоснабжения, разведения водоплавающей птицы и рыбоводства. Кроме того, в Белгородской области построены четыре водохранилища: Солдатское, Моравинское, Старооскольское и Белгородское. Площадь прудов изменяется на протяжении отдельных сезонов, а также в течение нескольких лет, в связи с чем встает задача ее оперативного контроля и разработки эффективных способов мониторинга.

Картографирование водных объектов на основе материалов спутниковой съемки представляет особый интерес, так как космические снимки одномоментно покрывают обширную территорию и достоверно отражают текущие формы и площади водных объектов. Благодаря этому материалы спутниковой съемки становятся все более широко востребованными [1–4]. Данные многозональной космической съемки можно применять как для оценки площадей водного зеркала, так и для более детальных исследований, например анализа экотонных участков на границе водной поверхности и суши, а также альтиметрии водоемов [5–7]. При этом дешифрирование можно проводить и визуальным, и автоматизированным способом.

Автоматизированное дешифрирование во многих случаях осложнено специфическим спектральным откликом снимка. Данная проблема проявляется при распознавании небольших объектов, сопоставимых по размеру с пространственным разрешением космического снимка. Выделение водных объектов также может быть осложнено наличием цветущих и зарастающих водоемов. Поэтому применение автоматических методов дешифрирования для их выделения по исходному снимку далеко не всегда эффективно. В связи с этим встает вопрос поиска улучшающего спектрального преобразования снимка, оптимально усиливающего спектральные различия между типами объектов и позволяющего автоматическим алгоритмам достоверно разделять их между собой, а также выделять их спектральные подклассы. Во многих случаях выбор наиболее информативного спектрального индекса или диапазо-

на может сыграть решающую роль в исследовании природных объектов по данным дистанционного зондирования [8–11].

Следует отметить, что для повышения точности выделения классов объектов на космических снимках кроме спектральных преобразований можно использовать другие типы улучшения информационных свойств изображений, например пространственные преобразования, предварительную сегментацию.

Цель настоящей статьи — проведение исследования, направленного на поиск спектрального преобразования снимка, позволяющего достоверно выделять водные объекты автоматическим способом и оценивать внутренние неоднородности водного зеркала на примере водоемов Белгородской области.

### МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принципиальная схема исследования (рис. 1) включала стадии от выбора территории исследования и разработки требований к спутниковым материалам до анализа динамики зеркала водных объектов. В качестве объекта изучения были выбраны водоемы Белгородской области, а в качестве материалов дистанционного зондирования использовались данные съемки Landsat-5, удовлетворяющие требованиям подобных исследований и единственные, имеющиеся в свободном доступе не только на текущее время, но и на период середины 1980-х гг.

Для выделения водных объектов можно использовать непосредственно исходный снимок либо картограммы его улучшающих преобразований (спектральных индексов), которые являются результатом математических операций с каналами снимков. На основе применения спектральных индексов проводится большинство современных исследований, связанных с анализом спектра снимков. Отобранные нами типы улучшающих преобразований снимков (табл. 1) проанализированы на предмет их эффективности для автоматического выделения водных объектов.

Спектральные индексы, приведенные в табл. 1, отобраны таким образом, чтобы представлять основные типы спектральных преобразований: простые зональные отношения, нормализованные индексы и индексы, полученные при расчете спектральных составляющих, к которым относятся главные компоненты и преобразования Tasseled Cap. Спектральные преобразования Tasseled Cap и преобразования снимка по методу главных компонент основаны на расчете некоррелированных составляющих снимка, позволяющих более детально анализировать его спектральный отклик. Наряду с определением точности дешифрирования водных объектов с использованием представленных в таблице индексов анализировалась точность дешифрирования водных объектов автоматизированным способом непосредственно по исходному снимку.

Анализ эффективности улучшающих преобразований включал следующие этапы.

1. Создание векторных слоев водных объектов с оценкой их площади для территории трех районов Белгородской области (Ивнянского, Белгородского и Новооскольского) путем визуального дешифрирования многозональных снимков Landsat-5. Визуальное дешифрирование водных объектов проводилось преимущественно по прямым дешифровочным признакам (форма, размер, цвет). При этом были использованы различные комбинации каналов. В первую очередь это сочетания 7, 5, 3 каналов, 4, 3, 2 и комбинация 3, 2, 1 каналов (естественные цвета) Landsat-5. Векторные слои послужили основой для проверки результатов последующего автоматизированного дешифрирования.

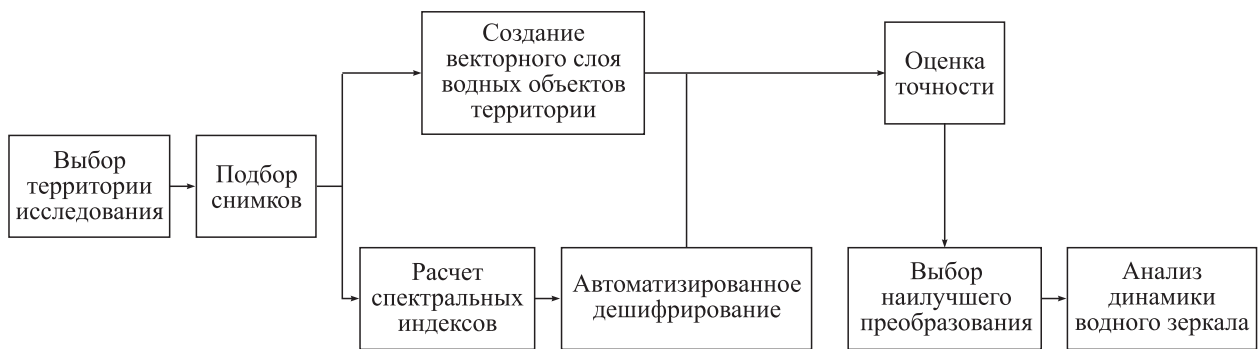


Рис. 1. Схема поиска наиболее эффективного улучшающего спектрального преобразования снимка.

Спектральные индексы, анализируемые в исследовании

Индекс	Формула индекса на основе спектральных яркостей каналов снимка
ND32	$(TM3 - TM2)/(TM3 + TM2)$
ND53	$(TM5 - TM3)/(TM5 + TM3)$
ND54	$(TM5 - TM4)/(TM5 + TM4)$
ND57	$(TM5 - TM7)/(TM5 + TM7)$
NDVI	$(TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$
NLI	$(TM4^2 - TM3)/(TM4^2 + TM3)$
RDVI	$(TM4 - TM3)/\sqrt{(TM4 + TM3)}$
SAVI	$(TM4 - TM3) \times (1 + L)/(TM4 + TM3 + L)$
TM4/3	TM4/TM3
TM5/4	TM5/TM4
TM5/7	TM5/TM7
MSR	$(TM4/TM3 - 1)/\sqrt{TM4/TM3 + 1}$
PC (компоненты)	0,054TM1 + 0,130TM2 + 0,143TM3 + 0,595TM4 + 0,709TM5 + 0,321TM7 -0,079TM1 + 0,121TM2 + 0,212TM3 + 0,787TM4 + 0,421TM5 + 0,372TM7 0,230TM1 + 0,504TM2 + 0,616TM3 + 0,140TM4 + 0,472TM5 + 0,266TM7
Tasseled Cap (компоненты)	0,304TM1 + 0,279TM2 + 0,474TM3 + 0,559TM4 + 0,508TM5 + 0,186TM7 -0,285TM1 - 0,244TM2 - 0,544TM3 + 0,704TM4 + 0,084TM5 - 0,180TM7 0,151TM1 + 0,197TM2 + 0,328TM3 + 0,341TM4 - 0,711TM5 - 0,457TM7

Примечание. TM1–TM7 — спектральные каналы спутника Landsat-5, L — поправочный коэффициент, равный 0,5.

2. Расчет спектральных индексов из табл. 1 и проведение на основе их значений классификации без обучения (ISODATA) со следующими единичными параметрами: количество классов — 50, число итераций — 20, порог сходимости — 0,95. Выбор классификации без обучения вызван стремлением обеспечить минимальное вмешательство в процесс автоматического дешифрирования.

3. Анализ результатов классификации и их сопоставление с результатами визуального дешифрирования. Выбор наиболее эффективного показателя осуществлялся по следующей группе критериев:

- а) водные объекты, выделенные на основе конкретного показателя, не должны перекрываться с другими типами объектов, представленных на территории;
- б) суммарная площадь водных объектов должна минимально отличаться от реальной;
- в) водные объекты должны классифицироваться не одним, а группой классов, чтобы можно было не только выделять водные поверхности, но и оценивать внутренние различия, обусловленные, например, разным качеством воды, степенью зарастания водоема.

Стадии исследования от расчета индексов до получения векторного слоя водных объектов характеризует рис. 2.

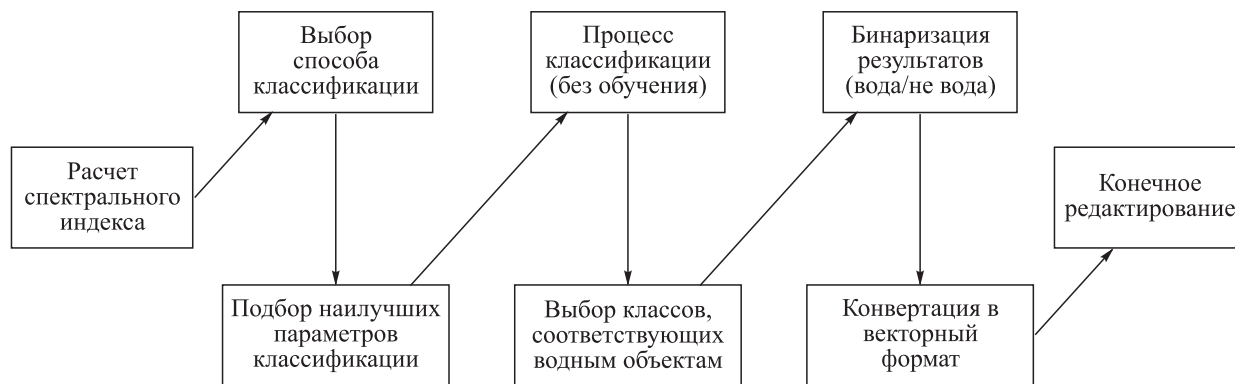


Рис. 2. Технологическая схема дешифрирования водных объектов.

На основе отконвертированных в векторный формат растров водных объектов была проведена оценка их площади, осуществлен выбор наиболее эффективных преобразований, которые целесообразно использовать для картографирования водных объектов. Итоговая стадия исследования включала создание слоев водных объектов Белгородской области за период 1986–2011 гг. и оценку динамики их площади за этот период.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка результатов дешифрирования по первому критерию (степень перекрытия с другими классами объектов) показала, что наиболее точно позволяют отделять водные объекты преобразование Tasseled Cap, главные компоненты, нормализованное отношение 5-го и 7-го каналов снимка (ND57). Значения остальных индексов не позволяют достоверно отделять водные поверхности от других объектов, в первую очередь от небольших массивов сосновых лесов и некоторых типов сельскохозяйственных полей.

Анализ эффективности спектральных преобразований по второму критерию (отклонение вычисленной площади водного зеркала от реальной) выявил наиболее эффективным индекс Tasseled Cap (табл. 2). В табл. 2 приведены только те спектральные индексы, которые оказались эффективными после их анализа по первому критерию.

Оценка по третьему критерию (выявление спектральных подклассов внутри водных объектов) однозначно определила индекс Tasseled Cap как наиболее эффективное преобразование. Только на основе его значений водные объекты классифицировались не одним, а 5–9 классами, т. е. значения данного индекса позволяют эффективно выделять спектральные неоднородности внутри самих водных объектов. Таким образом, по результатам оценки эффективности спектральных преобразований для автоматического дешифрирования водных объектов установлено, что для их выделения на космических снимках и оценки спектральных особенностей целесообразно использовать преобразование Tasseled Cap.

Если возникает необходимость простого выделения водных поверхностей (без вычленения подклассов) среди остальных типов объектов, то наряду с данным преобразованием можно одинаково эффективно использовать исходный снимок или преобразованный в первые три главные компоненты (PC). При повышении числа классов до 100 классификация исходного снимка дает приблизительно такие же результаты, как и классификация значений Tasseled Cap, но отличается тем, что кластеризация исходного снимка выделяет воду, как правило, одним классом.

Анализ изменения водного зеркала Белгородской области требовал создания безоблачных мозаик на всю территорию региона за период с 1986 по 2011 г. В табл. 3 приведены характеристики снимков, используемых в исследовании. Все изображения привязаны в системе координат UTM с датумом WGS 84. Однако для удобства их расположение указано в соответствии с международным обозначением сцен Landsat. Path и Row — координаты снимков в мировой системе координат WRS-2, используемой для определения местоположения снимков Landsat-5, -7. Для соблюдения максимального соответствия при сопоставлении результатов спутниковые данные за разные годы были подобраны за возможно близкие друг к другу сезонные сроки.

Дешифрирование водных объектов на основе преобразования Tasseled Cap позволило вычислить и проанализировать площадь водных объектов Белгородской области, а также проследить ее изменение за анализируемый период в масштабах всей области и ее административных районов. Картографирование водных объектов в масштабах всей Белгородской области было выполнено на основе снимков Landsat-5 методом классификации без обучения с числом классов 100 и 20 итераций.

Таблица 2

**Отклонение площади водного зеркала, вычисленное на основе значений спектральных индексов, от реальной**

Источник данных	Площадь водных объектов, га					
	Ивнянский район	Отклонение от реальной площади	Белгородский район	Отклонение от реальной площади	Новооскольский район	Отклонение от реальной площади
Исходный снимок	652	–119	2193	44	865	–206
Преобразования Tasseled Cap	768	–3	2209	60	986	–85
Главные компоненты	709	–62	1926	–223	887	–184
ND57	743	–28	2009	–140	911	–160
Реальная площадь	771	0	2149	0	1071	0

Таблица 3  
Покрытие Белгородской области снимками Landsat-5

Координаты снимков в системе WRS-2		Покрытие области снимками 1986 г.	Покрытие области снимками 2011 г.
Path	Row	Дата съемки	
177	25	13.06.1986	02.06.2011
177	24	13.06.1986	02.06.2011
176	25	22.06.1986	08.06.2011
178	25	07.08.1986	28.08.2011

Несмотря на то что процесс дешифрирования был максимально автоматизирован, ряд факторов потребовал ручной корректировки. К ним относятся:

а) присутствие на снимке облаков и теней от них, которые формируют спектральный отклик, близкий или аналогичный водным объектам;

б) наличие расширенных русел рек, участки которых имеют такой же спектр, как и у остальных водных поверхностей. Руслу рек шириной более 25–30 м выделяются при автоматическом дешифрировании как водные поверхности, что по сути верно, но не является задачей исследования. Удаление от-

дешифрированных широких участков русел можно произвести только вручную с предварительной конвертацией растрового слоя водных объектов в векторный формат;

в) присутствие очень малых прудов, размеры которых по ширине сопоставимы с пространственным разрешением снимка, в результате чего они могут выделяться не единым объектом, а группой близко расположенных отдельных пикселей. В большинстве случаев площадь водных объектов, определенная автоматической классификацией, оказывается несколько меньше реальной. Это объясняется тем, что пиксели снимка, расположенные на границе водной поверхности и суши, при автоматическом дешифрировании не определяются как водные объекты, что приводит к занижению их площади. В этом плане эффективность преобразований Tasseled Cap особенно важна, так как при классификации снимка на 50 классов в категорию водных объектов попадает не один класс, а несколько. Соответственно появляется возможность более надежно отобрать пиксели чистых водных поверхностей и пиксели, лежащие на границе с береговой линией;

г) не вполне идеальная процедура конвертации растрового слоя отклассифицированных по снимку водных объектов в векторный формат.

Несмотря на выявленные недостатки результатов автоматического дешифрирования, корректировка его результатов в нашем случае заняла намного меньше времени, чем потребовалось бы при ручной оцифровке всех водных объектов Белгородской области.

Таблица 4  
Изменение площади водоемов Белгородской области с 1986 по 2011 г., вычисленное по результатам автоматического дешифрирования снимков

Район	Площадь водоемов, га		Изменение площади водоемов, га
	1986 г.	2011 г.	
Алексеевский	511,9	496,5	-15,4
Белгородский	845,4	1668,5	823,1
Борисовский	322,6	327,0	4,4
Валуйский	629,7	644,2	14,5
Вейделевский	588,7	596,0	7,3
Волоконовский	346,5	387,6	41,1
Грайворонский	630,4	676,8	46,4
Губкинский	779,4	927,3	147,9
Ивнянский	506,7	542,7	36,0
Корочанский	752,4	760,9	8,5
Красненский	98,7	185,5	86,8
Красногвардейский	720,4	729,7	9,3
Краснояржский	437,1	418,9	-18,2
Новооскольский	802,9	912,9	110,0
Прохоровский	296,7	346,0	49,3
Ракитянский	1216,6	1095,0	-121,6
Ровеньский	517,9	617,2	99,3
Старооскольский	1596,2	1740,4	144,2
Чернянский	286,2	320,6	34,4
Шебекинский	343,0	1291,3	948,3
Яковлевский	766,2	931,3	165,1
Итого...	12 995,6	15 616,3	2620,7

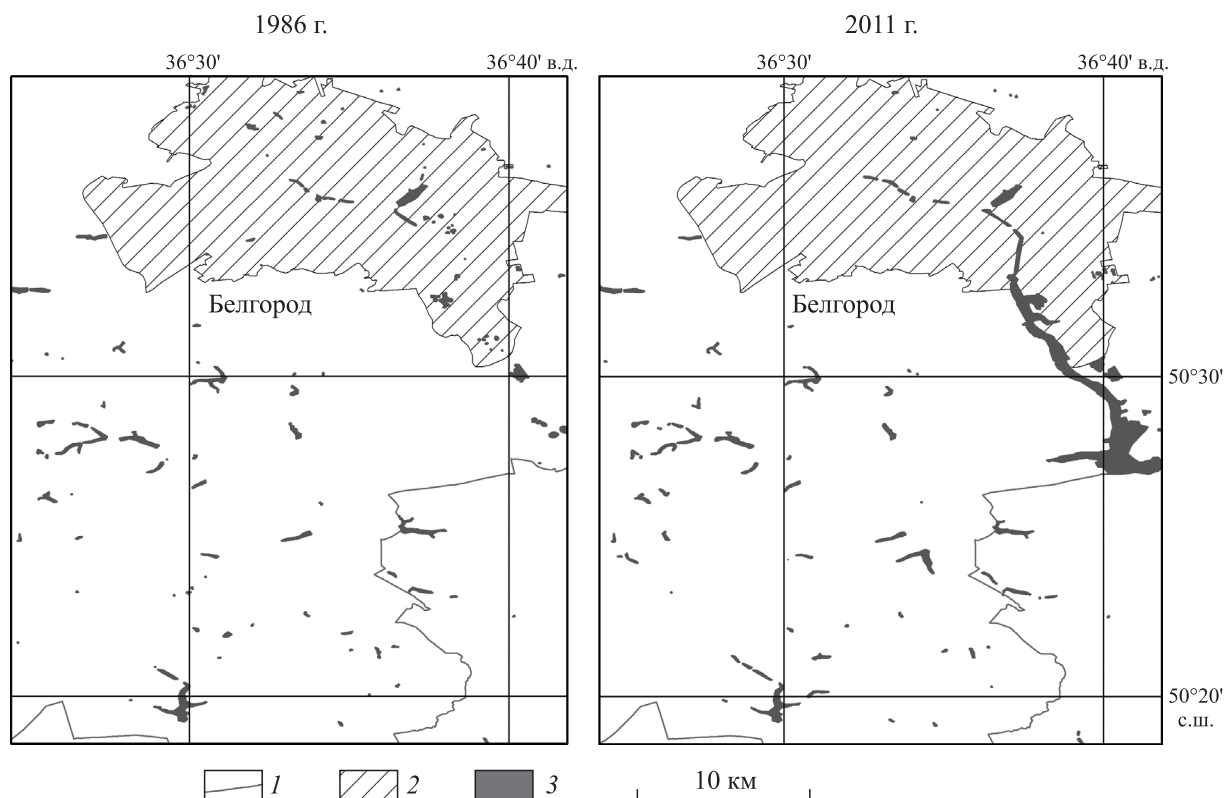


Рис. 3. Фрагмент территории Белгородской области с контурами водоемов в 1986 и 2011 гг.

1 — границы административных районов; 2 — г. Белгород в границах 2011 г.; 3 — водоемы.

Оценка изменения площади водоемов Белгородской области за 25 лет показала практически повсеместное ее увеличение (табл. 4). Рост характерен для восемнадцати из двадцати одного административного района.

Таким образом, исследование площадей водных объектов методом их автоматического поиска на снимке позволило оценить степень изменения водного зеркала за 25 лет. За данный период площадь водоемов области выросла более чем на 18 % (2620,7 га) (рис. 3). В первую очередь увеличение площади обусловлено созданием Белгородского водохранилища (территория Белгородского и Шебекинского административных районов), а также появлением значительного количества прудов, организация которых активно происходила во второй половине 1980-х гг.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования эффективности спектральных преобразований многозональных космических снимков показали, что для анализа спектрального отклика водных поверхностей наиболее информативным является линейное преобразование спектральных яркостей Tasseled Cap. При классификации водного зеркала с числом классов 50 и более данное преобразование позволяет выделить 5–10 классов, соответствующих водным объектам и характеризующих их внутренние различия по спектральным признакам. Для выделения собственно водного зеркала целесообразно использовать исходный снимок с заданием очень большого числа классов при классификации либо снимок, преобразованный по методу главных компонент. Автоматизированное дешифрирование покрытия снимков Белгородской области позволило оценить динамику площади водного зеркала за 25 лет.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (12-05-97510-р\_центр\_а «Разработка региональных моделей бассейновой организации природопользования на основе оптимизационных методов и геоинформационного моделирования»).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Frazier P. S., Page K. J.** Water body detection and delineation with Landsat TM data // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. — 2000. — Vol. 66, N 12. — P. 1461–1467.
2. **Yuan F., Sawaya K. I., Loeffelholz B. C., Bauer M. E.** Landcover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing // Remote sensing of Environment. — 2005. — N 98. — P. 317–328.
3. **Абросимов А. Б., Дворкин Б. А.** Возможности практического использования данных ДЗЗ из космоса для мониторинга водных объектов // Геоматика. — 2009. — № 4. — С. 54–63.
4. **Курбатова И. Е.** Использование данных космического мониторинга для оценки экологического состояния крупных речных водосборов // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2010. — Т. 7, № 2. — С. 157–166.
5. **Кутузов А. В.** Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода–суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища) // Исслед. Земли из космоса. — 2011. — № 6. — С. 64–72.
6. **Студеникин А. В., Филиппов О. В.** Автоматизированные технологии обработки материалов ДЗЗ в комплексном мониторинге Волгоградского водохранилища // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2011. — Т. 8, № 3. — С. 192–198.
7. **Троицкая Ю. И., Рыбушкина Г. В., Соустова И. А. и др.** Спутниковая альтиметрия внутренних водоемов // Вод. ресурсы. — 2012. — Т. 39, № 2. — С. 169–185.
8. **Crist E. P., Cicone R. C.** A physically-based transformation of Thematic Mapper data — the TM Tasselled Cap // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 1984. — Vol. 22. — P. 256–263.
9. **Sudheer K. P., Gard V.** Lake water quality assessment from landsat thematic mapper data using neural network: An approach to optimal band combination selection // Journ. of the American Water Resources Association. — 2006. — N 12. — P. 1683–1695.
10. **Терехин Э. А.** Анализ каналов спутниковых данных LANDSAT TM для оценки характеристик лесных насаждений Лесостепной провинции Среднерусской возвышенности // Исслед. Земли из космоса. — 2012. — № 2. — С. 53–61.
11. **Терехин Э. А.** Информативность спектральных вегетационных индексов для дешифрирования сельскохозяйственной растительности // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9, № 4. — С. 243–248.

*Поступила в редакцию 16 января 2013 г.*