

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА СИСТЕМ “ВОДА–СУША” НА РАВНИННЫХ  
ВОДОХРАНИЛИЩАХ (НА ПРИМЕРЕ ЦИМЛЯНСКОГО  
ВОДОХРАНИЛИЩА)**

© 2011 г. А. В. Кутузов

*Учреждение Российской академии наук Институт водных проблем РАН, Москва*

*E-mail: kutuzov.st@gmail.com*

Поступила в редакцию 01.01.2010 г.

Предлагаются решения для анализа структуры и динамики береговых экотонов “вода–суша” на основе обработки данных дистанционного зондирования (ДЗ) и материалов комплексных полевых исследований на побережьях крупных равнинных водохранилищ степной биогеографической зоны, на примере Цимлянского водохранилища (Волгоградская и Ростовская обл.). Показана продуктивность использования для выделения экотонной территории среднемасштабной космосъемки, которая позволяет получать снимки с периодичностью до двух недель (MODIS Terra), при разрешении до 250 м/пиксел. Для генетического и контурного дешифрирование экотонной структуры побережий: экотона “вода–суша” крупных равнинных водохранилищ – требуется использование данных ДЗ высокого разрешения (Landsat – 15–60 м). Данные использованных источников (спутниковые снимки разных сенсоров, данные GPS, векторные слои топоосновы, материалы лесотаксации и др.) показали хорошую совместимость для целей мониторинга, обеспечивая основу комплексной характеристики блоков экотона “вода–суша”, для обоснования выделения блоков экотона. При первичной оценке структуры этого типа экотона удовлетворительные результаты дает анализ спутникового снимка в спектре максимального поглощения воды (канал 5 Landsat), без использования вегетационных индексов.

**Ключевые слова:** экотон, спутниковые снимки, MODIS, Landsat, дешифрирование, мониторинг, вегетационные индексы, побережье, Цимлянское водохранилище

## ВВЕДЕНИЕ

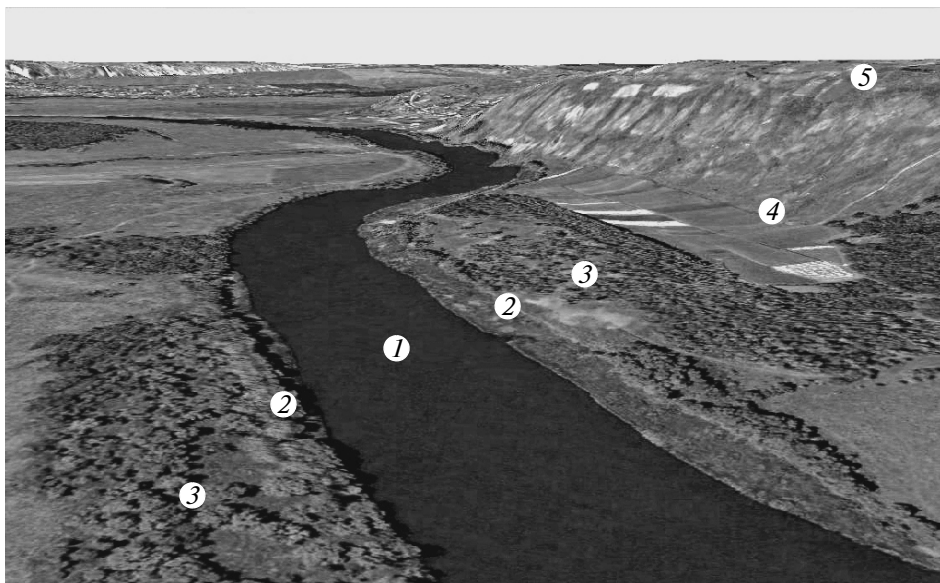
Применение данных дистанционного зондирования (ДЗ), позволяет фиксировать состояние территории практически одновременно, с одинаковыми условиями наблюдения всех участков мониторинга. Основным объектом исследований была переходная зона между наземными и водными биоценозами, экотон “вода–суша” побережья Цимлянского водохранилища (Волгоградская и Ростовская обл.).

Переходная, пограничная, зона между биоценозами нередко простирается на сотни метров, представляя собой особое местообитание со своими специализированными видами (Небел, 1993; Залетаев, 1997). Для такой полосы широко используется термин “экотон”, предложенный впервые геоботаником Клементсом (Clements, 1905); в современном “ландшафтном” понимании в отечественной географии понятие “экотон” разработывал В.Б. Сочава (Сочава, 1978).

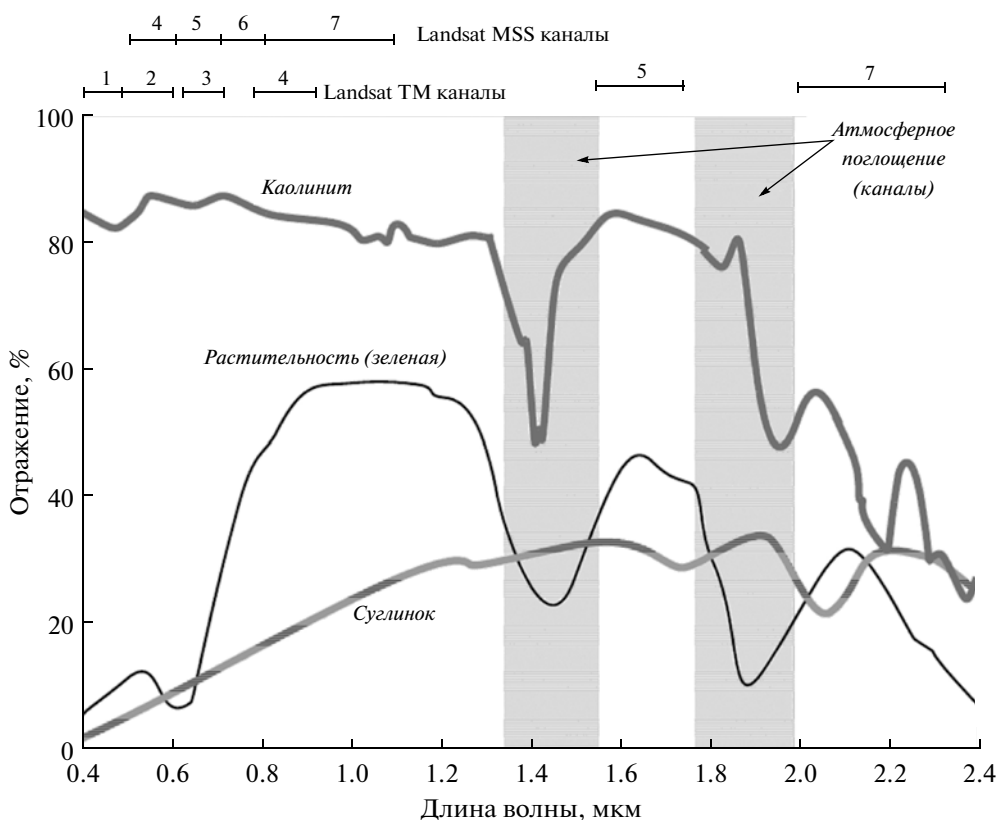
Основной целью работы была оценка возможности данных ДЗ среднего (100–1000 м/пиксел) и высокого (10–100 м/пиксел) разрешения для

определения границ переходной зоны, анализа структуры и динамики ландшафтов береговых экотонов, организации мониторинга биоконплексов с учетом экотонной структуры территории. В ходе реализации решались следующие задачи: 1) обработка полученных с сайта NASA спутниковых снимков MODIS (среднее разрешение) и Landsat (высокое разрешение) – для последующего анализа и выделения блоков экотона “вода–суша” (ERDAS 9.x); 2) создание разнородных слоев геоинформационной системы (ГИС) (в ArcGIS 9.x) и последующего тематического дешифрирования для экологической характеристики объекта, в том числе для отражения полевых данных комплексного топтоэкологического профилирования побережий; 3) описание динамики ландшафтов – для обоснования при выделении блоков экотона.

Исследовались биоконплексы экотонов на побережьях крупных равнинных водохранилищ различных биогеографических зон - здесь приведены данные по Цимлянскому водохранилищу: степная зона (Балук и др., 2007а). Принципиальной структурой экотона “вода–суша” принималось



**Рис. 1.** Структура экотона “вода–суша” речной долины: 1 – аквальный, 2 – амфибиальный (флуктуационный), 3 – динамический, 4 – дистантный, 5 – маргинальный (на примере поймы р. Дон – спутниковый снимок в Google Планета Земля).

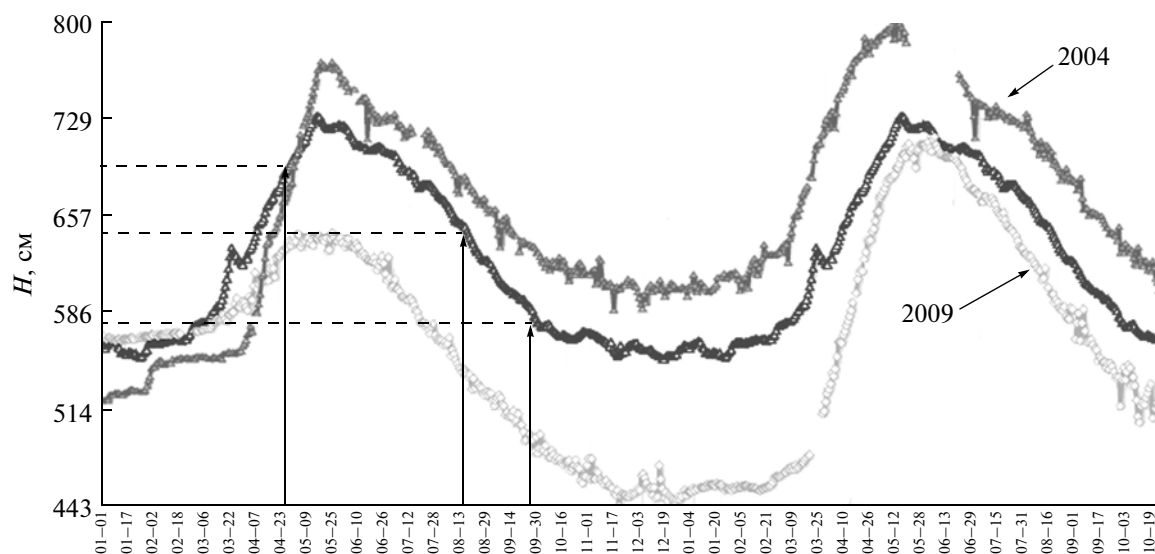


**Рис. 2.** Данные Landsat: соотношение спектральных каналов мультиспектральных сканирующих радиометров. Кривые спектральной яркости для почвы и растительности.

выделение пяти блоков: (Залетаев, 1997) – рис. 1 ([http://kutuzov-st.narod.ru/DDZ\\_IzizK.htm](http://kutuzov-st.narod.ru/DDZ_IzizK.htm)).

Для первого блока – флуктуационного – характерно ежегодное заливание паводковыми во-

дами на продолжительные сроки (более 250 дней в году) (Балюк и др., 2007а), для водохранилища это зона сработки. Второй блок – динамический – может заливаться не каждый год: средняя продол-



**Рис. 3.** Средний уровень поста «Цимлянский», по данным ФГУП «Центр Регистра и водного кадастра» (12.04.2001–29.09.2009). Ноль поста: 28.00 м. Вертикальные стрелки (слева направо) – максимумы уровня на период интенсивной вегетации: начало и конец вегетации в степи, окончание – на пойме.)

жительность заливания 75 дней в году. Влияние водоема на прилегающую территорию простирается и за пределами динамического блока через грунтовые воды (ГВ) за счет подпора их выходов на побережье водохранилища. Сток ГВ может замедляться и даже обращаться, подтапливая прилегающие территории. Отсюда начинается дистантный блок, длящийся до границы влияния ГВ, определенной глубиной до 3 м. На этой глубине ГВ еще доступны большинству растений вследствие капиллярного подъема воды. Высотные отметки этой границы могут значительно отличаться в разных ландшафтах. В зависимости от литологии почв данного блока – песчаные или глинистые, – высота капиллярного подъема колеблется, изменяется граница дистантного блока экотона.

За границей доступности ГВ начинается маргинальный блок, динамика растительности в ко-

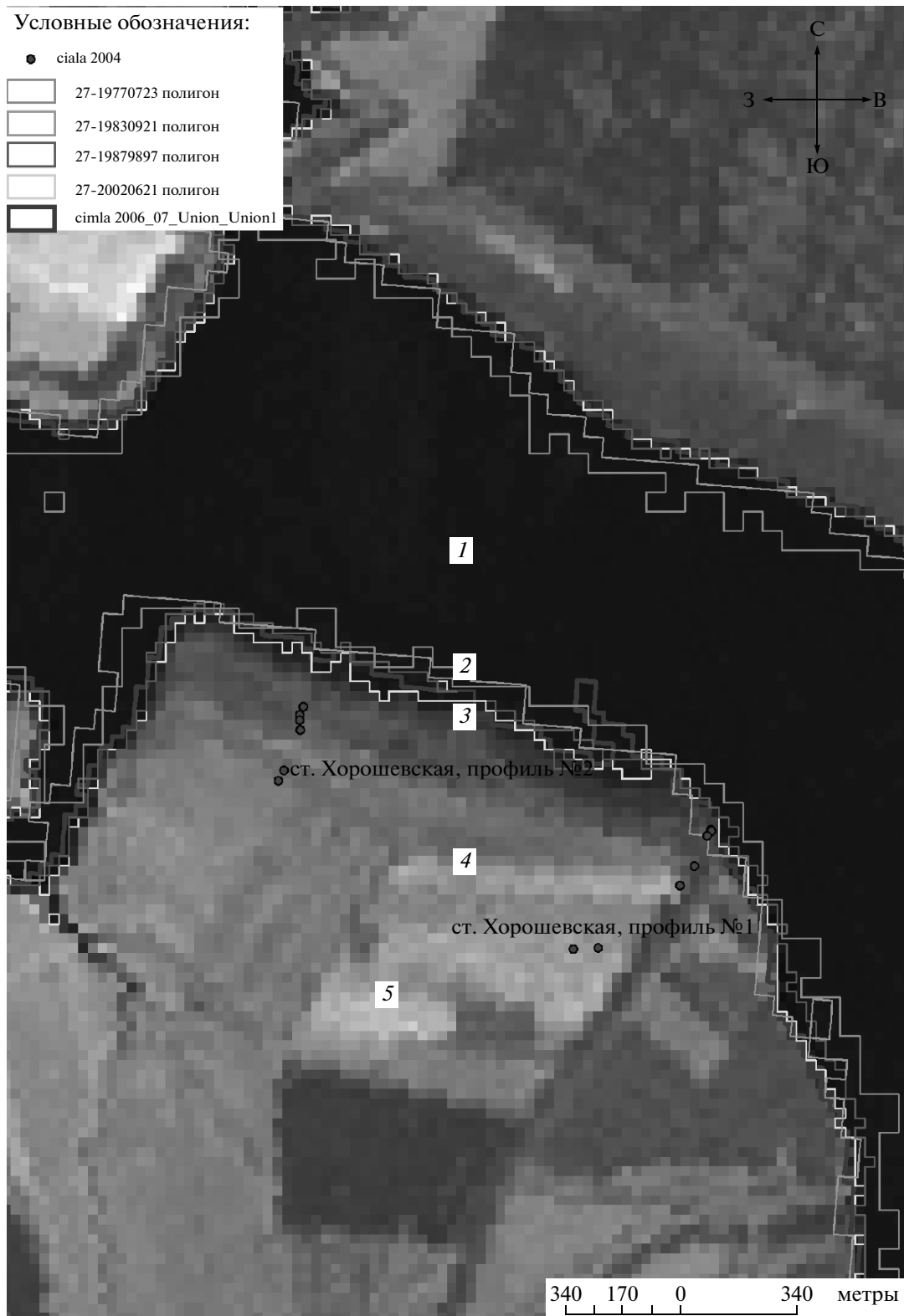
тором опосредована динамикой в предыдущих блоках экотона за счет видов вселенцев. По мере удаления от водохранилища растительность этого блока становится типичной – зональной. Таким образом, верхняя граница этого блока должна быть размыта (рис. 1, 4).

Этапы обработки данных ДЗ следующие: 1) определение для снимков Landsat соответствующих уровней стояния вод Цимлянского водохранилища; 2) подготовка к полуавтоматической (экспертной) оцифровке; 3) обработка полученного векторного слоя; 4) совмещение со снимками MODIS и др. векторными данными, анализ результатов.

Для определения интересующих спектральных каналов выявляются диапазоны наибольших различий в спектральной яркости объектов мониторинга: почва, вода (Кравцова, 2005); переходная же территория – зона временного затопления –

Спектральные характеристики MODIS. Выделены светлым каналы MODIS, присутствующие в использованных снимках MOD13Q1 ([https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_overview](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_overview))

| № канала | Длина волны, мкм | Применение                                  | Название слоя HDF-файла                |
|----------|------------------|---|--|
| 1        | 0.67–0.62        | Изменение растительного покрова             | red reflectance (красный)              |
| 2        | 0.876–0.841      | Облачность, изменение растительного покрова | NIR reflectance (ближний инфракрасный) |
| 3        | 0.479–0.459      | Разделение почвы и растительности           | blue reflectance (голубой)             |
| 4        | 0.565–0.545      | Зеленая растительность                      |  |
| 5        | 1.25–1.23        | Лиственный покров                           |  |
| 6        | 1.652–1.628      | Разделение снега и облаков                  |  |
| 7        | 2.155–2.105      | Облачность                                  | MIR reflectance (дальний инфракрасный) |
| 8        | 0.42–0.405       | Хлорофилл                                   |  |
| 9        | 0.448–0.438      | То же                                       |  |
| 10       | 0.493–0.483      | «   |  |
| 11       | 0.536–0.526      | «   |  |



**Рис. 4.** Изменение береговой линии на ключевых участках топо-экологического профилирования – подложка Landsat (2007 г.) Максимум уровня – по полученным снимкам Landsat, июль 1977 г. (жирная белая линия, контуры суши), минимум – сентябрь 1983 г. (линия, далеко выдающаяся в водохранилище). 1 – аквальный, 2 – амфибиальный (флуктуационный), 3 – динамический, 4 – дистантный, 5 – маргинальный: 2–5 – по данным профилирования.

б

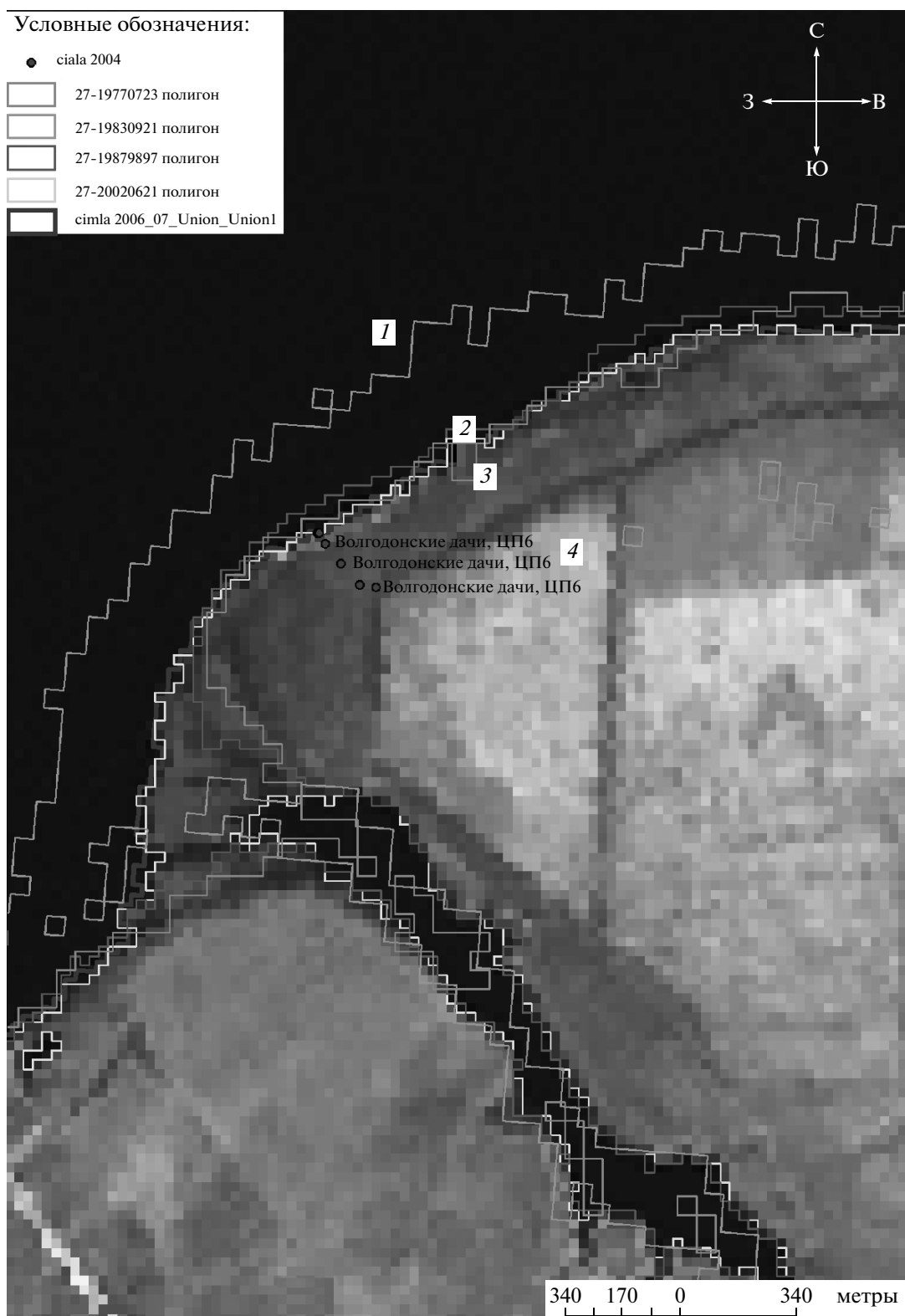
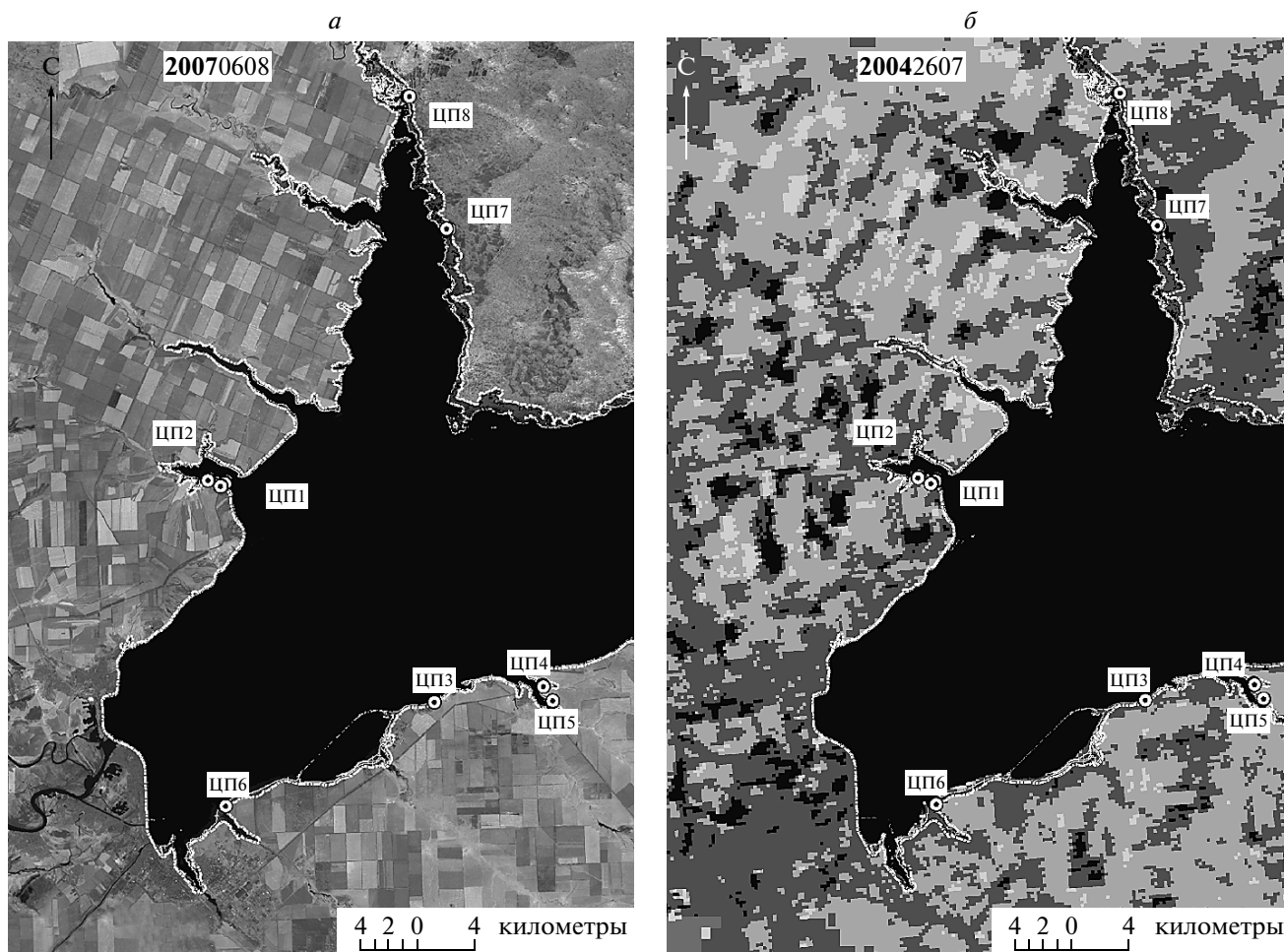


Рис. 4. Окончание.



**Рис. 5.** Динамика уреза вод и ландшафтов для высокого и низкого уровней воды: *а* – снимок Landsat от 08.06.2007 г.; *б, в* – сезон высокой воды в разные годы, по данным MODIS; *г–е* – изменение суши и акватории в разные сезоны одного года, по данным MODIS. Черный цвет – вода; более светлые участки – зона низкой фотосинтетической активности. ЦП – номера цимлянских топоэкологических профилей.

контролируется при сравнении снимков для периодов высокой и низкой воды. По опубликованным источникам определялись рекомендуемые спектральные каналы для синтеза такого контрастного снимка по определенному классу объектов, затем составлялось сочетание слоев на основе экспертной оценки (Кутузов, 2007).

Визуально, при загрузке в ГИС-вид разных слоев MODIS (таблица), наиболее четко вода контрастирует с окружением: для red – 7, green – 5 и blue – 6 синтезированных слоев снимка (каналы MODIS: 7, 2, 3 в таблице соответственно). Полученные цветовые границы сопоставляются с другими слоями ГИС. При создании таблицы использовались данные официального сайта NASA.

Подтверждением объективности результатов для данного метода отбора каналов может служить график спектральной яркости (растительность-почва-вода) в диапазоне этих каналов. Здесь яркость воды минимальна, почвы и расти-

тельности значительно больше – их разность дает удовлетворительный контраст на береговой линии (рис. 2). Для Landsat – аналогично использование канала 5 (TM и ETM+) и каналов 3–4 (MSS), причем эти каналы всех трех сенсоров обладают близкими спектральными характеристиками.

На основе одновременных снимков территории, автоматической векторизацией классифицированного снимка получены границы вода-суша для разных уровней стояния воды. Созданный таким образом векторный слой показал хорошую согласованность с базовыми слоями и полевыми данными, привязанными по GPS-приемнику (рис. 5*а*).

Основой для отбора данных ДЗ по дате их создания является месячная динамика уровня водохранилища на интересующий период: максимум и минимум в сезон вегетации. Обычно эти экстремумы для Цимлянского водохранилища приходятся на май и сентябрь месяцы (рис. 3). Наи-

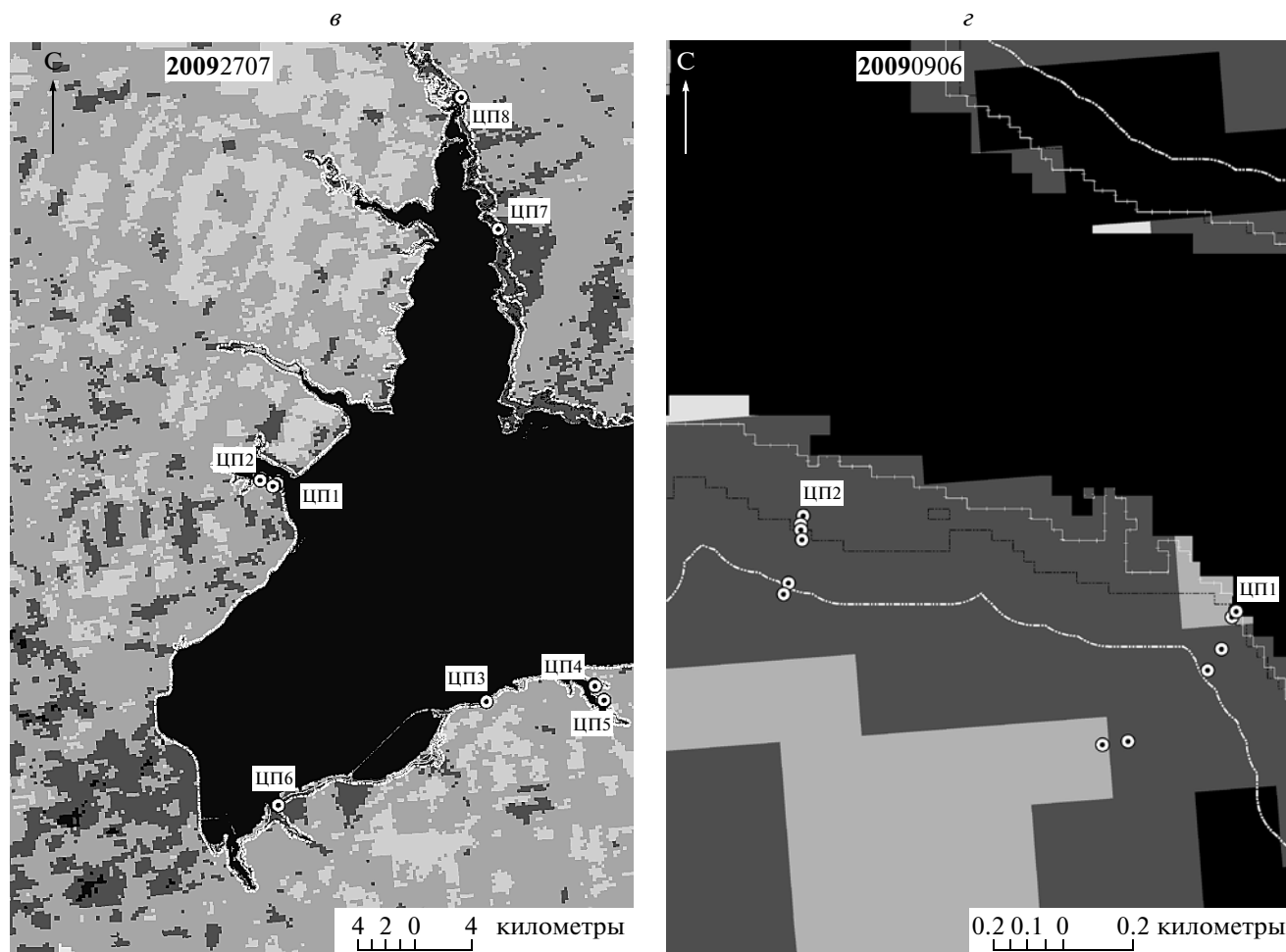


Рис. 5. Продолжение.

большие отклонения от средних значений в последние 15 лет отмечались в 2004 г. (высокий уровень) и 2009 г. (низкий уровень).

Данные ДЗ в свободном доступе за период с 1973 г. по настоящее время: за этот период минимумы и максимумы (рис. 4) очень близки к экстремумам последнего десятилетия.

Другой важный критерий для последующей обработки космоснимка — облачность над территорией на выбранный период. Для степной зоны в период вегетации облачность редко оказывается помехой. На снимках среднего масштаба хорошо заметна динамика уреза вод для уровней высокой и низкой воды: значительное изменение площади активной вегетации — темный цвет на снимке, белая линия — граница акватории (рис. 5а–5е). В сезон высокой воды — май, образуются мелководья, которые позднее частично или полностью, в зависимости от влажности года, ежегодно обсыхают; снимок в осенний период покажет реальное на этот год обсыхание. Преимущество использо-

вания снимков MODIS в частоте их повторности и в их доступности. Выполнена обработка таких снимков для экстремумов уровня стояния вод за вегетационный период, что позволило проследить динамику заливания пойменной территории, — это объективная основа для проведения границы между динамическим и флуктуационным блоками.

При выборе каналов учитываются разрешение каждого из них и диапазон спектра отражения для хлорофилла растений и для воды (таблица). Для количественной оценки состояния растительного покрова используются стандартные вегетационные индексы (EVI и NDVI), вычисляемые в отношении к значениям яркости в той части спектра, которая наиболее полно представлена: растительность — красная и ближняя инфракрасная части

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

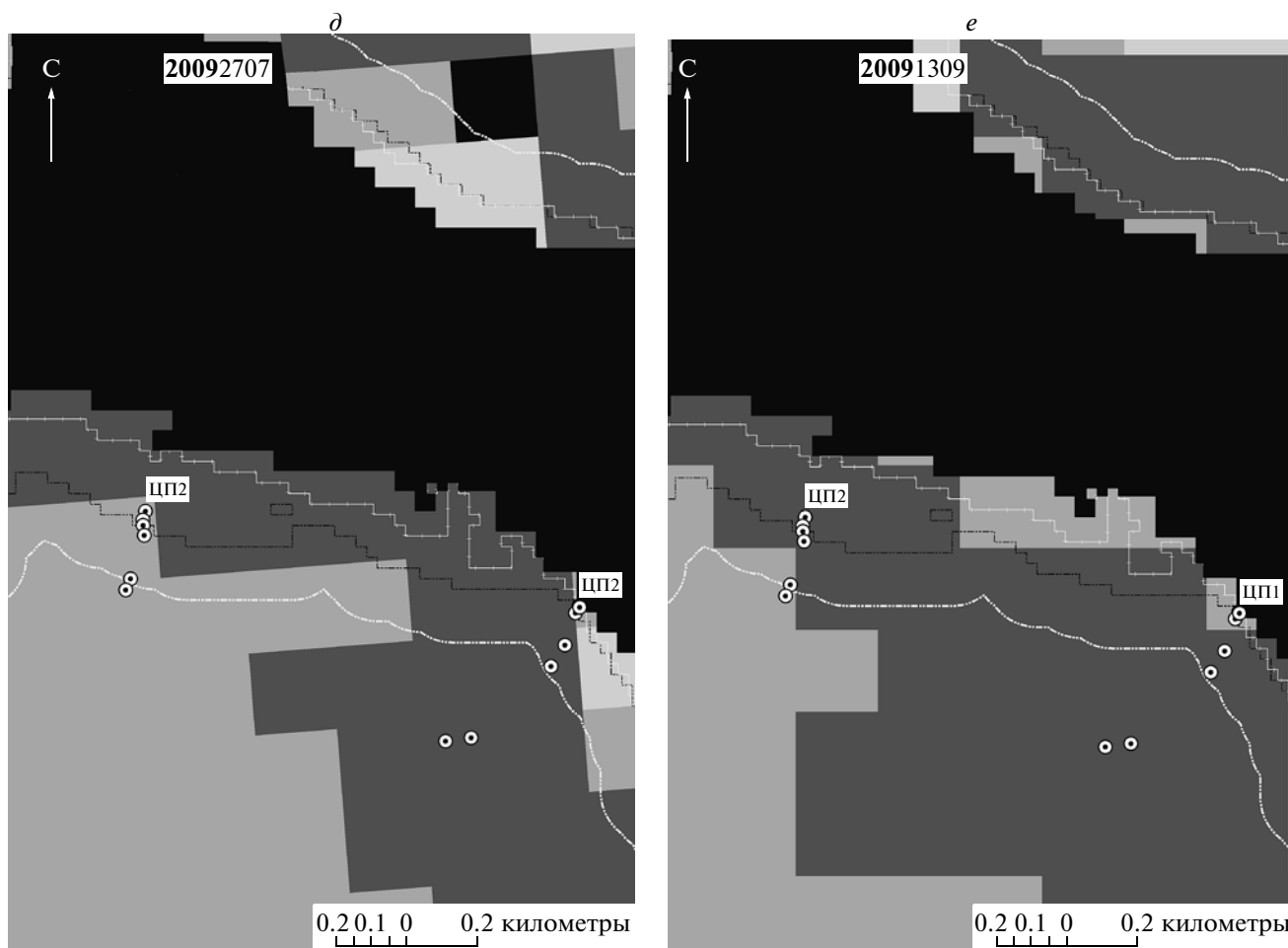


Рис. 5. Окончание.

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной, *RED* – красной областях спектра;

$$EVI = G \times \frac{NIR - RED}{NIR + C1 \times RED - C2 \times Blue + L},$$

где *NIR*, *RED*, *BLUE* – значения отражательной способности в ближней инфракрасной, красной и голубой зонах (0.876–0.841; 0.67–0.62 и 0.479–0.459 мкм соответственно); *L* – поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы; *C1*, *C2* – коэффициенты, контролирующие вклад голубой зоны в коррекцию красной из-за рассеяния атмосферными аэрозолями(0). Примерные значения этих коэффициентов применительно к MODIS-EVI алгоритму: *L* = 1, *C1* = 6, *C2* = 7.5 и *G* = 2.5 (Evrendilek et al., 2008). Этот индекс позволяет выделить больше градаций в районах с обилием зеленой биомассы и имеет преимущества для мониторинга растительности, поскольку влияние почвы и атмосферы в значениях EVI минимизировано ([http://gis-lab.info/docs/atbd\\_mod13.pdf](http://gis-lab.info/docs/atbd_mod13.pdf)). В период цветения воды водохранилища (водо-

росли и цианобактерии, содержащие хлорофиллы) высокие значения NDVI могут отмечаться и в границах водной поверхности.

Вычисление этих индексов (и ряда других) входит в стандартный пакет современных версий ПО ГИС. Использование лесотаксационных данных и совмещение с географически привязанными картами лесотаксации, гипсометрии и топографии данной территории позволяет хорошо дешифровать материалы космосъемки. По результатам дешифрирования создаются сигнатуры (ERDAS 9.0) для возможности контролируемой (полуавтоматической) и автоматической обработки поступающей спутниковой информации для мониторинга динамики водно-наземного экотона побережий (Балюк, 2007б).

## ВЫВОДЫ

Для анализа структуры и динамики береговых экотонів продуктивно использование средне-масштабной космосъемки, которая позволяет по-

лучать снимки с периодичностью до двух недель (MODIS Terra), при разрешении до 250 м/пиксел. Динамика ландшафтов хорошо прослеживается на таких снимках после предварительной обработки и соответствует данным полевых исследований. Генетическое (класс объекта) и контурное (очертания) дешифрирование экотонной структуры побережий: экотон вода-суша крупных равнинных водохранилищ — требует использование данных ДЗ высокого разрешения (Landsat — 15–60 м). Данные ДЗ, использованные в работе (спутниковые снимки разных сенсоров, GPS-данные, векторные слои), показали хорошую совместимость для целей мониторинга, обеспечивая основу для выделения блоков экотона вода-суша и оценки их характеристик. При первичной оценке структуры экотона удовлетворительные результаты дает анализ спутникового снимка в спектре максимального поглощения воды (канал 5 Landsat), без использования вегетационных индексов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балюк Т.В., Кутузов А.В., Назаренко О.Г.* Экотонная система юго-восточного побережья Цимлянского водохранилища // Водные ресурсы. 2007а. Т. 34. № 1. С. 104–112.
- Балюк Т.В.* Возможности мониторинга паводкового затопления на территории природного парка “Волго-Ахтубинская пойма” при помощи данных дистанционного зондирования / Состояние, охрана, воспроизводство и устойчивое использование биологических ресурсов внутренних водоемов // Материалы межд. научно-практ. конф. Волгоград, 2007б. С. 16–19.
- Залетаев В.С.* Речные поймы как система экотонов // Экосистемы речных пойм: структура, динамика, ресурсный потенциал, проблемы охраны / Под ред. В.С. Залетаева. М.: РАСХН, 1997. С. 7–17.
- Кравцова В.И.* Космические методы исследования почв. М.: Аспект Пресс, 2005. 190 с.
- Кутузов А.В.* Закономерности формирования экотонных систем в зоне влияния искусственных водоемов / Состояние, охрана, воспроизводство и устойчивое использование биологических ресурсов внутренних водоемов // Материалы межд. научно-практ. конф. Волгоград, 2007. С. 179–182.
- Небел Б.* Наука об окружающей среде. Т. 1. М.: Мир, 1993. С. 229–248.
- Сочава Б.В.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
- Clements F.E.* Research Methods in Ecology. Lincoln, Neb.: Univ. Publ., 1905. 334p.
- Evrendilek F., Gulbeyaz O.* Deriving Vegetation Dynamics of Natural Terrestrial Ecosystems from MODIS NDVI/EVI Data over Turkey // Sensors 2008. V. 8. № 9. P. 5270–5302. doi:10.3390/s8095270.
- <http://77.108.74.231/Hydroposts/default.aspx>
- [http://eos-webster.sr.unh.edu/data\\_guides](http://eos-webster.sr.unh.edu/data_guides)
- [http://gis-lab.info/docs/atbd\\_mod13.pdf](http://gis-lab.info/docs/atbd_mod13.pdf)
- <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>
- <http://www.gisa.ru/43962.html>
- <http://www.landscape.edu.ru/files/sbornikLP/Solodyankina.pdf>
- [https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_overview](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_overview)

## Monitoring of the Large Flat Water Reservoirs Using Remote Sensing Data

A. V. Kutuzov

*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

Decisions for the analysis of structure and dynamics coastal ecotones “water-land”, on the basis of processing RSD and materials of complex field researches at coasts of large flat reservoirs, as an example Tsimlyansky reservoir (Volgograd and Rostov districts) — a steppe biogeographical zone are offered. Efficiency of use, for allocation ecotone territory, middle scale satellite images which allows receiving pictures with periodicity about two weeks (MODIS Terra), at the permission to 250 m/pixel. For genetic and contour interpretation ecotone structures of coasts, ecotone: “water-land” of large flat water basins — is required use RSD of the high permission (Landsat — 15–60 m). The data of the used sources (satellite pictures of different sensor controls, GPS-data, vector layers base map, materials forest valuation, etc.). Have shown good compatibility for monitoring, providing a basis of the complex characteristic of ecotone blocks “water-land”, for a substantiation of allocation of it. At a primary estimation of structure of this type ecotone satisfactory results the analysis of a satellite picture in a spectrum of the maximum absorption of water (Landsat, ch. 5), without use of vegetation indexes.

**Keywords:** ecotone, satellite images, MODIS, Landsat, interpretation, monitoring, coast, vegetation indexes, Tsimlyansky reservoir