

Использование космической информации для мониторинга природно-территориальных комплексов побережья Цимлянского водохранилища

И.Е. Курбатова

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

E-mail: irenkurb@yandex.ru

Описан опыт использования крупномасштабных космических изображений ИСЗ WorldView-2 при исследовании динамики природно-территориальных комплексов побережья Цимлянского водохранилища в сложных условиях маловодного периода 2011 г. Произведена фиксация состояний береговой зоны водохранилища по результатам дешифрирования снимков, на которых отображены изменения в облике водоема при чрезвычайном понижении уровня. Трансформирование спутниковых изображений и координатная привязка выполнялись с помощью программы QuantumGIS. Составлены карты динамики береговой линии как для наиболее характерных участков берегов, устьев рек, балок и т.д., так и для всего водохранилища.

Ключевые слова: космический мониторинг, водохранилище, маловодный период, негативные ситуации, береговая зона, обмеление, переформирование берегов, картографирование.

Введение

В последние десятилетия климатические условия на территории России заметно изменились – они характеризуются повышением температуры в холодные сезоны года, ростом испаряемости при сохранении или снижении количества атмосферных осадков за теплый период, ростом повторяемости засух, изменением годового стока рек и его сезонным перераспределением. По прогнозу Росгидромета до 2025 г. (Оценочный доклад..., 2008) в густонаселенных регионах юга России возобновление водных ресурсов уменьшится на 5–15%, а водопотребление увеличится на 5–25%.

Для южной части европейской территории России эти изменения отражают наступление маловодного периода. По своим последствиям маловодье может быть приравнено к экстремальным гидрологическим ситуациям (Коронкевич, Зайцева, 2010), которые непосредственно влияют на экологическое состояние водоемов, качество жизни населения и эффективность таких жизненно важных секторов экономики, как гидроэнергетика, промышленное и сельскохозяйственное производства, жилищно-коммунальное хозяйство, речное судоходство.

Водохранилища юга России в гораздо большей степени, чем водохранилища других природных зон, чувствительны к изменениям климата и усилению антропогенной нагрузки. В последние годы практически на всех как малых, так и крупных водоемах региона из-за маловодья наблюдалось заметное падение уровня воды, которое привело к обнажению мелководий, повышению температуры, активному размножению сине-зеленых водорослей и, соответственно, ухудшению качества воды.

К основным задачам изучения водохозяйственных комплексов региона относятся:

- инвентаризация водного объекта (получение значений его основных морфометрических характеристик, для водохранилищ – изменение значений этих характеристик при наполнении или сработке);
- контроль и наблюдение за негативными природными процессами (гидрологическими, геоморфологическими, биологическими и т.д.);
- выявление и наблюдение за источниками негативных антропогенных воздействий на водные объекты и их водосборы.

В условиях дефицита данных сети наземных наблюдений актуальным и перспективным направлением является развитие системы наблюдений за состоянием водохозяйственных объектов с помощью космического мониторинга и ГИС-технологий. Основная цель мониторинга – обеспечение органов управления водным хозяйством достоверной и современной информацией. Космический мониторинг по определению М.А. Болсуновского (Болсуновский, 2010) заключается в непрерывном многократном получении информации о качественных и количественных характеристиках природных и антропогенных объектов и процессов с точной географической привязкой за счет обработки данных, получаемых с ИСЗ. Такой мониторинг позволяет получать однородную и сравнимую по качеству информацию единовременно для обширных территорий суши и акваторий, что практически невозможно при наземных обследованиях.

Методы и подходы

При проведении геоэкологического мониторинга водохранилищ и их прибрежных территорий значительный объем информации обеспечивается в оперативном режиме благодаря наличию крупномасштабных космических изображений высокого и сверхвысокого разрешения. На их основе можно проследить локальные изменения гидрологических и геоморфологических характеристик, трансформацию почвенного и растительного покровов и т.п. К наиболее значимой современной группировке спутников относятся ИСЗ компании DigitalGlobe – QuickBird, WorldView-1, WorldView-2, суммарная мощность выполнения съемки которых составляет более 2,2 млн. км² в день с разрешением на местности 0,5–1,84 м (Берсан, 2009). Детальная информация, получаемая компанией DigitalGlobe после запуска ИСЗ WorldView-2, благодаря проведению космической съемки высокого разрешения в восьми каналах, позволяет уточнить и детализировать классификацию характеристик земной и водной поверхности, значительно повысить возможности дешифрирования и точность измерений линейных и площадных объектов по сравнению с другими системами ДЗЗ. Наличие этой информации способствует принятию правильных водохозяйственных и природоохранных решений на государственном и региональном административных уровнях (Махер, 2011). 8-канальный спектрометр, установленный на борту WorldView-2, проводит съемку в тех спектральных диапазонах, в которых наиболее отчетливо отражаются свойства характеристик земной поверхности. Основные характеристики и области применения съемки в разных спектральных каналах представлены в сводной таблице, составленной по материалам статей (Махер, 2011; Жилнев, 2009).

Таблица 1. Основные направления использования данных съемки в узких спектральных диапазонах при изучении водных объектов и их прибрежных зон

<i>Номер канала</i>	<i>Наименование спектрального канала</i>	<i>Длины волн (нм)</i>	<i>Основное назначение данных съемки в соответствующих спектральных каналах при решении природноресурсных задач</i>
1	Фиолетовый (прибрежный)	400–450	Использование оптимально при глубоководных исследованиях и вычислении некоторых индексов «зелености». Излучение в данном диапазоне поглощается хлорофиллом в здоровых растениях, что способствует проведению вегетационного анализа
2	Синий	450–510	Предназначен для отображения побережий, наносов, определения глубин благодаря хорошему проникновению излучения в данном диапазоне сквозь водную толщу (до глубины 13,5 м)
3	Зеленый	510–580	Использование оптимально для оценки концентрации наносов и взвесей в мутной воде. Эти данные обеспечивают точное определение отражательной способности растений, оценку их жизнеспособности; их использование совместно с данными съемки в желтом канале эффективно для распознавания видов растений
4	Желтый	585–625	Использование оптимально для классификации объектов суши. По данным съемки в этом канале обнаруживается желтизна (снижение содержания хлорофилла) конкретных растений на земле и в воде
5	Красный	630–690	Один из важнейших каналов съемки для выделения растений и оценки их состояния. Использование данных этого канала эффективно для классификации грунтов без растительности, дорог, геологических объектов
6	Крайний красный	705–745	Использование данных съемки в этом канале эффективно для выделения и классификации растительности и оценки ее состояния
7	Ближний инфракрасный-1	770–895	Использование данных съемки в этом канале эффективно для отделения водоемов от растительности и обеспечивает разделение видов растений и грунтов
8	Ближний красный-2	860–1040	Использование данных съемки в этом канале обеспечивает проведение более глубокого анализа растительности и исследования биомассы. Съемка в данном канале менее подвержена атмосферному влиянию

Таким образом, с помощью данной информации может быть решен широкий круг задач оценки экологического состояния водных объектов и окружающих территорий.

Результаты

В качестве объекта исследования было выбрано оказавшееся в сложной экологической ситуации Цимлянское водохранилище – искусственное море площадью 2700 км² и длиной 280 км, созданное в 1952 г. для решения задач гидроэнергетики, судоходства, водообеспечения региона, рыболовства. За 60 лет его существования накопились такие экологические проблемы, как переформирование берегов, заиление дна, ухудшение качества воды вследствие цветения и загрязнения, уменьшение рыбных запасов, резко

обострившиеся в маловодный период. По данным Донского бассейнового водного управления (БВУ), уменьшение весеннего притока паводковых вод к Цимлянскому водохранилищу до 54% от нормы (в 2007 г.) и до 34% (в 2011 г.) впервые за 27 лет привело к снижению его уровня больше чем на 4 м – с 36 (отметки нормального подпорного уровня) до 31,75 м абс. Наблюденный в ноябре 2011 г. уровень лишь на 75 см превышал уровень мертвого объема. За всю историю существования водохранилища такие ситуации случались лишь несколько раз.

Несмотря на то, что в 2012 г. и в первой половине 2013 г. наполнение Цимлянского водохранилища почти нормализовалось и уровень воды поднялся до отметки 35 м, было принято решение проанализировать экстремальную ситуацию 2010–2011 гг., поскольку вероятность повторения таких событий в современных условиях остается весьма высокой.

В данной работе осуществлена попытка решения базовой задачи мониторинга – проведения инвентаризации состояния береговой зоны водного объекта при наступлении критической гидрологической ситуации. Для анализа были использованы космические изображения высокого разрешения, полученные с ИСЗ WorldView-2 осенью 2011 г., когда уровень воды был близок к минимальному. Решение задачи потребовало предварительного изучения основных процессов трансформации береговой зоны и их генезиса, обусловленных воздействием самого водоема, влиянием водосбора и антропогенными факторами. Для составления прогноза возможного дальнейшего развития ситуации было необходимо на начальной стадии исследований провести анализ раздельного влияния на формирование береговой зоны водохранилища природных и антропогенных факторов.

По гидрологическому режиму и морфометрическому строению Цимлянское водохранилище делится на четыре участка (Гидрометеорологический..., 1977) (табл. 2). Эти участки в разной степени реагируют на изменение уровня водоема и его заиление. Наиболее чувствительными к изменениям уровня являются Верхний и Чирской участки, частично Центральный. В пределах этих участков при сработке уровня воды на 1,5–2,5 м прекращается судоходство по всем дополнительным трассам и сохраняется только по основной – приуроченной к бывшему руслу Дона. Поступающие по р. Дон наносы отлагаются в основном в верхней части водохранилища – на Чирском плесовом участке и выше. Сочетание двух факторов – снижения уровня и отложения речных наносов – является доминирующим в развитии верхней части водохранилища.

Таблица 2. Характеристики участков Цимлянского водохранилища

Название участка	Ширина, км	Глубина, м	
		средняя	максимальная
1. Приплотинный	21	12	35
2. Центральный	13	8,8	15
3. Чирской	22	6,0	10,0
4. Верхний	5,0	3,0	10

Совместный анализ топографической карты этого участка (рис. 1б, участок 1) и космического изображения ИСЗ WorldView-2, полученного 24 сентября 2011 г., показал существенные изменения в облике плеса. Уровень воды в водохранилище, по данным Донского БВУ, на дату съемки соответствовал 32,15 м абс, что почти на 4 м ниже нормального подпорного уровня (НПУ) (сайт Федерального агентства водных ресурсов). Такое понижение уровня привело к тому, что осушилась большая часть мелководных участков, находившихся на глубинах до 3,85 м, образовав острова, полуострова, вдольбереговые отмели и т.д. Их своеобразная конфигурация определяется течением р. Дон и осаждением речных взвесей. Часть из них является прирусловыми валами затопленного русла Дона. На снимке различными оттенками серого цвета отображаются обнажившиеся участки дна: светло-серым тоном – полностью осушившиеся, более темным – влажные илы; совсем темные – находящиеся под тонким слоем воды. Кроме того, водная поверхность полностью покрыта сине-зелеными водорослями, что характеризует неудовлетворительное качество воды. Полученная информация может быть использована как при обновлении батиметрической карты всего водохранилища с учетом заиления донного рельефа, так и при уточнении крупномасштабной лоции для обеспечения безопасности судового хода.

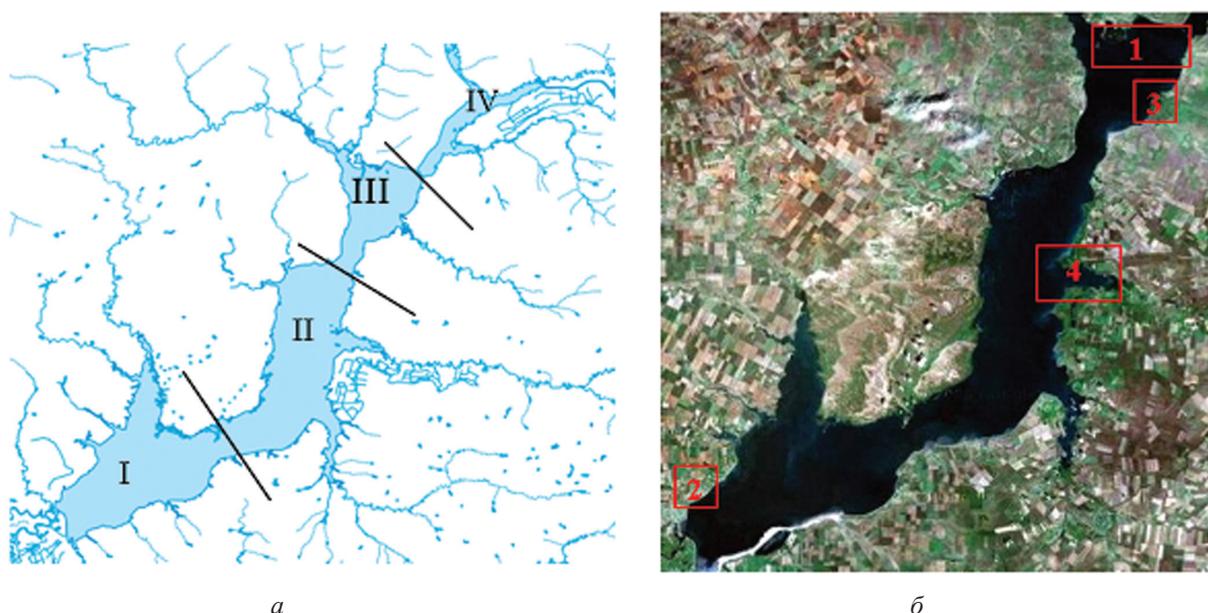


Рис. 1. Цимлянское водохранилище: а) гидрографическая схема, плесы: I – Приплотинный; II – Центральный; III – Чирской; IV – Верхний; б) расположение участков исследования: 1 – верхняя часть Чирского плеса; 2 – балка Крутая; 3 – устье р. Мышкова; 4 – устье р. Аксай Есауловский

К участкам другого типа, также чувствительно реагирующим на колебания уровня и накопление наносов, относятся устья балок и рек бокового притока, которые при заполнении Цимлянского водохранилища были затоплены и образовали различные по площади и конфигурации бухты и заливы (Гидрометеорологический..., 1977). Трансформация этих участков зависит от сочетаний и доминирования различных природных факторов: колебаний уровня водоема, волновых процессов, интенсивности отложения вдоль береговых наносов, объема твердого и жидкого стока самой реки. Площадь гидрографической сети

крупных оврагов и балок с протяжением более 1 км от устья в пределах защитной зоны водохранилища составляет около 60 000 га. Небольшие балки были отчленены от водоема за счет отложения наносов и волновой переработки берегов в первые же годы существования водохранилища. Яркими примерами различных трансформаций могут служить устья балки Крутая, рек Мышкова и Аксая Есауловского (участки 2, 3 и 4 на *рис. 1б*).



Рис. 2. Чирской плес (верхний озерный участок Цимлянского водохранилища): а) по состоянию на 1978 г. (фрагмент топографической карты масштаба 1 : 100 000, береговая линия соответствует отметке уровня 36 м абс); б) по состоянию на момент съемки ИСЗ WorldView-2 24.09.2011 (уровень воды – 32,15 м абс)

Балка Крутая, расположенная на правом берегу водохранилища в 4 км от г. Цимлянска, может служить характерным примером изменений в устьях подобных заливов под воздействием переработки абразионных берегов. Ее устье использовалось как удобный, защищенный почти от всех ветров залив (*рис. 3а*). Сочетание современного понижения уровня и накопления наносов, поступающих с водосбора балки, привело к тому, что устье балки перекрыто широкой отмелью, вход в бухту полностью отрезан от водохранилища (*рис. 3б*).



Рис. 3. Фрагменты космического изображения балки Крутая (вблизи Цимлянска): а) архив «Kosmosnimki.ru», масштаб увеличения 1 : 100 000; б) ИСЗ WorldView-2, 19 сентября 2011, масштаб 1 : 25 000

Примером трансформации устья малой реки может служить р. Мышкова, которая представляет собой водоток длиной 129 км и площадью водосбора 1393 км². При впадении в водохранилище она образовывала залив длиной 5 и шириной 3 км, в центре которого был остров высотой около 10 м. По берегам залива располагались рыбопитомники, обвалованные двухметровыми дамбами (рис. 4а). Сам залив был привлекателен для нереста рыб и нагула молоди. На карте Волгоградской области, составленной в 2005 г., залив еще существовал (Волгоградская..., 2005). На космическом изображении от 24 сентября 2011 г., полученном с ИСЗ WorldView-2 (рис. 4б) зафиксировано полное осушение залива и его зарастание кустарниковой и тростниковой растительностью, образование широкой отмели, перекрывающей бывший залив, и узкую прорезь русла реки в илистых отложениях отмели. Для этого низкого пологого участка берега характерны слабо выраженные процессы переработки и мелководье. Наблюдения за расходами воды в р. Мышкова не проводились ввиду их незначительности (Гидрометеорологический..., 1977). Таким образом, можно сделать вывод, что главным фактором исчезновения залива явилось многолетнее понижение уровня водохранилища.



Рис. 4. Засиление и зарастание устья р. Мышкова: а) топографическая карта масштаба 1 : 100 000 (1978 г, береговая линия соответствует НПУ 36 м абс); б) космическое изображение с ИСЗ WorldView-2 от 24.09.2011 (уровень воды – 32.15 м абс)

В качестве следующего примера рассмотрено переформирование дельты р. Аксай Есауловский, впадающей с левого берега в Центральный плес. Длина реки 179 км, площадь водосбора 2588 км², расход воды 38 м³/с. На карте 1978 г. залив имеет длину более 15 км и ширину 5 км. Так же, как и другие заливы, он использовался для укрытия рыболовецких судов, а хорошо прогреваемые мелководья являлись постоянными местом нерестилищ. Вдоль берегов размещались рыбопитомники (рис. 5а). К 2011 г. длина залива сократилась вдвое, осушившаяся часть заросла кустарниками и тростником, закрепив извилистые берега Аксая. По обе стороны от залива произошло приращение низких ровных берегов

за счет аккумуляции наносов и обмеления в результате понижения уровня водоема. Цепочка островов превратилась в далеко выступающий мыс, а территория рыбопитомников оказалась на суше. Ширина полосы приращения составила около километра (рис. 5б). На наш взгляд, в случае с формированием залива р. Аксай Есауловский в равной мере действовали все три фактора: аккумуляция наносов за счет волновой переработки берегов, постоянное снижение уровня водохранилища и отложение речных наносов в верхней части залива.



Рис. 5. Зарастание устья р. Аксай Есауловский: а) по состоянию на 1978 г. (топографическая карта масштаба 1 : 100 000, береговая линия соответствует отметке НПУ 36,0 м абс); б) космическое изображение высокого разрешения с ИСЗ WorldView-2 от 24.09.2011 г. (уровень воды – 32.15 м абс) – зарастание устья реки тростниковой и кустарниковой растительностью, уменьшение площади нерестилищ, обмеление берегов, цветение воды

На завершающем этапе исследования были составлены карты изменений состояния рассмотренных выше участков берегов в масштабе 1 : 200 000 и сводная карта для всего Цимлянского водохранилища в масштабе 1 : 750 000 (рис. 6). Поиск и подбор снимков для всего побережья осуществлялся по открытым каталогам ДЗЗ (табл. 3). Геопривязка, трансформирование карт, снимков и их оцифровка проводились в программе QuantumGIS.

Таблица 3. Перечень космических изображений, использованных при составлении карты

Космический аппарат	Номер снимка по каталогу	Разрешение, м	Дата съемки
QuickBird-2	101001000E1EA600	0,6	15.09.2011
QuickBird-2	101001000DEF3D00	0,6	12.08.2011
QuickBird-2	01001000D848300	0,6	28.05.2011
QuickBird-2	10100100073CA200	0,6	06.10.2007
QuickBird-2	1010010000AAAC00	0,6	24.06.2002
WorldView-2	103001000D8AC000	0,46	24.09.2011
WorldView-2	103001000D88C500	0,46	19.09.2011
WorldView-2	1030050008F8F400	0,46	11.09.2010

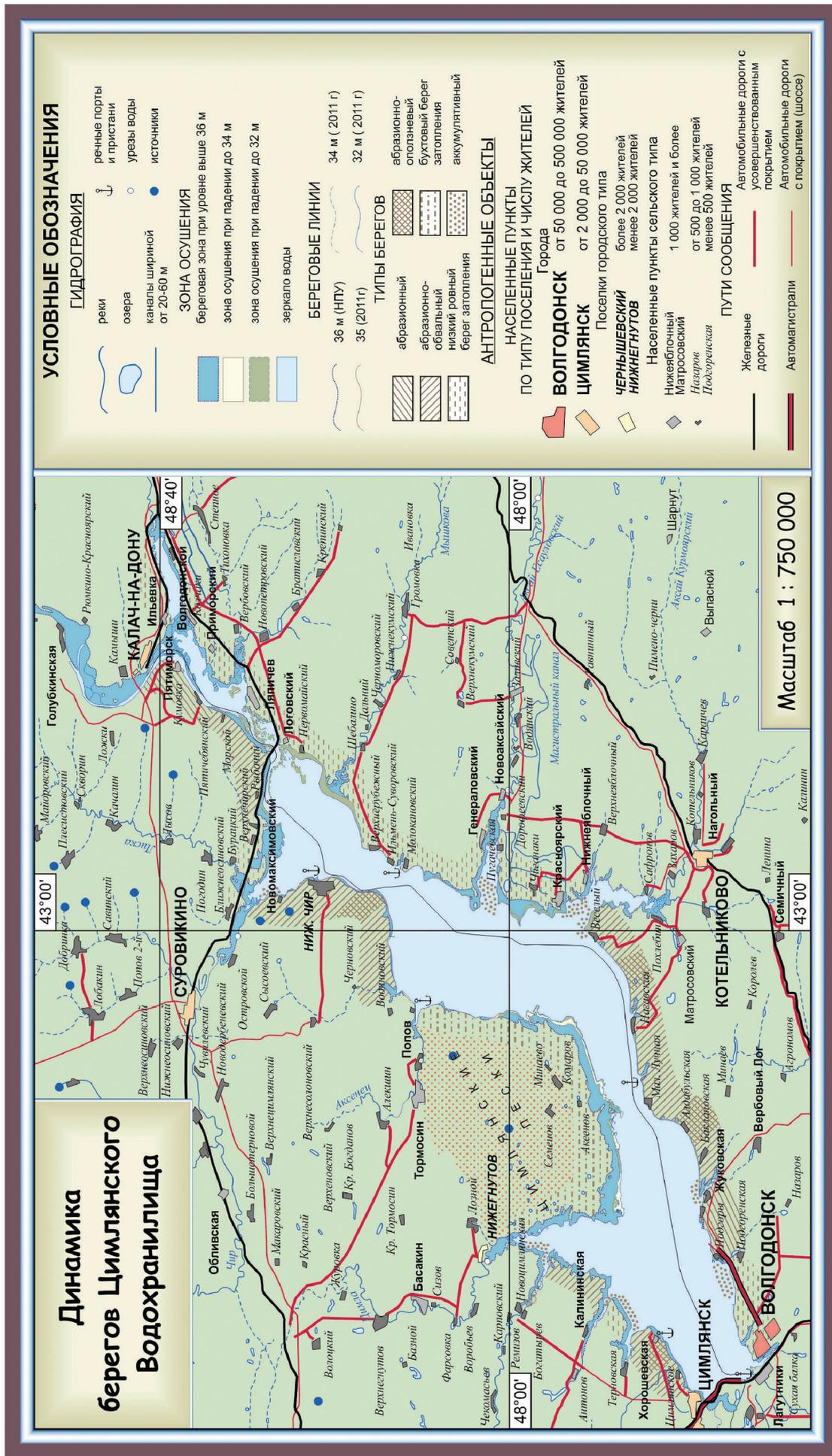


Рис. 6. Картографическое отображение изменений положения береговой линии при различных уровнях наполнения водохранилища

Основное тематическое содержание карт включает пространственную информацию о распределении типов берегов и динамике береговой линии при различных гидрологических ситуациях – нормальном подпорном уровне (36 м), промежуточном (34 м) и критически низком (32 м) уровнях воды. На картах также выделены зоны осушения берегов, соответствующие данным положениям уровня.

В случае дальнейшего понижения уровня и ухудшения экологического состояния водохранилища можно создать дополнительный слой в QuantumGIS для размещения в нем обновленной космической информации. Таким образом, выбранная методика совместного использования космической информации высокого разрешения и картографических материалов может быть использована для решения инвентаризационных задач геоэкологического мониторинга береговой зоны водохранилища.

Литература

1. *Берсан А.* Восемь спектральных каналов WorldView-2: расширенные возможности для более глубокого анализа и интерпретации изображения // *Геоматика*. 2009. № 3. С. 11–13.
2. *Болсуновский М.А.* Современные подходы к организации оперативного космического мониторинга // *Геоматика*. 2010. № 3. С. 13–18.
3. *Жилнев М.Ю.* Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке // *Геоматика*. 2009. № 3. С. 56–64.
4. *Коронкевич Н.И., Зайцева И.С.* Маловодье как экстремальное гидрологическое явление // *Экстремальные гидрологические ситуации*. М.: ООО «Медиа-ПРЕСС», 2010. С. 362–369.
5. *Махер Кури* Космическая съемка: вся суть – в деталях / Пер. с англ. // *Геоматика*. 2011. № 2 (11). С. 13–18.
6. Волгоградская область. Общегеографические карты Российской Федерации. Масштаб 1 : 500 000. ФГУП «Омская картографическая фабрика», 2005.
7. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 204 с.
8. Обоснование стратегии управления водными ресурсами. М.: Научный мир. 2006. 336 с.
9. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. М.: Росгидромет. 2008. 29 с.
10. Федеральное агентство водных ресурсов <http://voda.mnr.gov.ru>.

Utilization of space-based information for monitoring the environmental systems of the Tsimlyansk Reservoir coasts

I.E. Kurbatova

Water Problem Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: irenkurb@yandex.ru

There is described the experience of utilizing large-scale space images from satellite WorldView-2 in the study of environmental systems of the Tsimlyansk Reservoir coasts in their dynamics under the difficult conditions of year 2011 low water period. Fixing the states of the reservoir coastal zone is carried out resulted from interpretation of images that documented changes in the reservoir appearance when the level is extremely lowered. Transformation of satellite images and coordinate binding has been performed using program QuantumGIS. Maps of shoreline changes are compiled as for the most typical shore sections, estuaries, shoals, etc., and for the entire reservoir.

Keywords: space monitoring, reservoir, low-water period, negative situations, coastal zone, shallowing, re-forming coasts, mapping.