

УДК 528.8

*Д.А. Бурнис**, *Е.И. Бушуев***,
*В.И. Волошин***, *В.В. Демьянов**,
*О.И. Паршина***, *В.И. Саблина***,
*А.Ю.Худотеплый***

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ
ТЕХНОЛОГИЯ КЛАССИФИКАЦИИ
УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ
WORLDVIEW-2**

**Государственный региональный проектно-исследовательский институт
Днепрогипроводхоз, Днепропетровск*

***Государственное предприятие "Днепркосмос", Днепропетровск*

Запуск спутника WorldView-2 открывает новые возможности в развитии методов автоматизированной классификации земных покрытий благодаря богатому набору спектральных каналов и высокому пространственному разрешению аппаратуры этого спутника. Настоящая статья рассматривает логическую модель и технологию автоматизированной классификации земных покрытий с использованием данных WorldView-2. В соответствии с конкурсной заявкой в качестве основного объекта для проведения детальных исследований выбрана акватория рек Днепр и Самара в зоне г. Днепропетровска. В результате обработки получены тематические карты загрязнений (3 класса, 11 подклассов) и гидрологической ситуации. На основе этих карт и дополнительных наземных обследований разработан инженерный план реконструкции акватории с обоснованными оценками объемов строительных работ.

Запуск супутника Worldview-2 відкриває нові можливості в розвитку методів автоматизованої класифікації земних покривів завдяки багатому набору спектральних каналів і високої просторової розрізненості апаратури цього супутника. Дана стаття розглядає логічну модель і технологію автоматизованої класифікації земних покривів з використанням даних Worldview-2. Відповідно до конкурсної заявки в якості основного об'єкта для проведення детальних досліджень обрана акваторія рік Дніпро та Самара в зоні м. Дніпропетровська. В результаті оброблення отримані тематичні карти забруднень (3 класи, 11 підкласів) і гідрологічної ситуації. На основі цих карт і додаткових наземних обстежень розроблений інженерний план реконструкції акваторії з обґрунтованими оцінками обсягів будівельних робіт.

Введение

Начало работы по созданию единой европейской системы сбора и обмена информацией о состоянии природной среды континента было положено Программой CORINE (Coordination of information on the environment), инициированной Еврокомиссией (European Commission) в 1985 году [1]. Эта программа позволила объединить усилия ученых и специалистов западноевропейских стран по сбору, унификации и координации геопространственной и тематической информации о состоянии суши, растительности и водных ресурсов, распределении природных ресурсов, уровне урбанизации

и др., разработке новых подходов к получению и обработке данных с целью повышения эффективности управленческих решений.

В программе CORINE нашли широкое применение методы аэрокосмического мониторинга Земли. На основе материалов космических съемок со спутников Landsat и SPOT к началу 90-х годов были составлены цифровые карты земных покрытий для нескольких стран западной Европы в масштабе 1:100 000. Важным результатом программы CORINE явилось создание единой номенклатуры земных покрытий на территорию Европы (CORINE Land Cover Classification System). Это многоуровневая классификационная схема, с разбиением объектов на 5 классов на 1-м уровне, на 15 классов на 2-м уровне и на 44 класса на 3-м уровне. Следу-

© Бурнис Д.А., Бушуев Е.И.,
Волошин В.И., Демьянов В.В.,
Паршина О.И., Саблина В.И.,
Худотеплый А.Ю., 2011

ет подчеркнуть, что классификационная схема CORINE LCC допускает, при необходимости, дальнейшую детализацию в виде наращивания дополнительных уровней [2]. Эта возможность использована авторами в выполненном проекте.

Соответствие качества геопространственных данных базы CLC2000 и конечных информационных продуктов CORINE требованиям пользователей (муниципальных и региональных органов власти, землепользователей, экологов и т. д.) было проанализировано в проекте European Land Use/Cover Area Frame Statistical Survey - LUCAS) [3]. Исследование проводилось European Topic Centre on Terrestrial Environment (ETC/TE) при участии геоинформационной компании Gisat s.r.o. (Прага, Чешская республика). Анализ, проведенный в проекте LUCAS, показал, что, в основном, база CLC2000 и продукты на ее основе удовлетворяют запросам пользователей. Однако было отмечено, что:

1. Точность классификации некоторых категорий объектов уступает заявленной в CORINE общей точности 85%, причем процент ошибок увеличивается на более высоких уровнях. Большинство специалистов-практиков не устраивают заявленные величины минимальной картируемой площади (minimum mapping unit – MMU) 25 га и ошибки координатной привязки 100 м.

2. На решениях, принимаемых при классификации объектов на космических изображениях, сильно сказывается субъективный фактор. Устойчивость и воспроизводимость результатов обработки и анализа изображений, получаемых разными оператора-

ми-дешифровщиками, часто выходит за пределы допустимых статистических границ.

3. Для решения тематических задач высокого уровня номенклатура классов земных покрытий должна быть детализирована в соответствии с запросами конечных пользователей.

Автоматизированная технология классификации получила свое дальнейшее развитие в проекте TLCC [4], выполненного с участием авторов. Для проекта были использованы многоспектральные данные (1-9 каналы) аппаратуры ASTER, а именно, 3 канала видимого и ближнего ИК диапазонов (VNIR) с размером пиксела 15 м и 6 каналов среднего ИК диапазона (SWIR) с размером пиксела 30 м.

Многоцелевой характер использования земных покрытий обуславливает необходимость оптимизации структуры и характеристик классов. Оптимизация была построена на разумном компромиссе между реальными возможностями автоматизированной классификации, интерпретационными возможностями космических снимков (размеры пиксела 15 - 30 м) и национальными требованиями к картированию земных покрытий. Исходя из этих соображений, в качестве базовых были выбраны все CLC классы первого уровня, 11 классов второго уровня, 11 классов третьего уровня и дополнительно введены 6 классов четвертого уровня, представляющие интерес для региональных и локальных пользователей. При этом, как можно видеть из таблицы 1, были заданы значительно более “жесткие” требования к характеристикам классов.

Таблица 1 – Характеристики проектов CORINE CLC и TLCC

Параметр	CORINE CLC	TLCC
Количество классов	5/15 /44 /0	5/11 /11 /6
Ошибка координатной привязки к карте	100 м	70 м
Минимальная картируемая площадь	25 га для всех категорий	1 га - для водных объектов, 5 га - для других объектов
Минимальная ширина картируемых протяженных объектов	100 м	30 м
Общая точность классификации	> 85 %	≥ 90 %

Для реализации автоматизированной технологии классификации земных покрытий в качестве базовой программной среды проекта были выбраны средства ENVI [5] и Definiens [6].

Достигнутая общая точность классификации по заявленным классам составила 88 – 92 %.

Цель проекта и научные задачи

Запуск спутника WorldView-2 открывает новые возможности в развитии методов автоматизированной классификации земных покрытий, благодаря богатому набору спектральных каналов и высокому пространственному разрешению аппаратуры этого спутника.

Основной целью представляемой работы является научное обоснование и уточнение логической модели обработки данных применительно к территории городской застройки, а также соответствующей автоматизированной технологии классификации земных покрытий с использованием данных WorldView-2.

В соответствии с конкурсной заявкой в качестве основного объекта для проведения детальных исследований была выбрана акватория рек Днепр и Самара в зоне г. Днепропетровска.

Исходя из поставленной цели, были сформулированы следующие научные и практические задачи:

- определить информационные возможности снимков WorldView-2;
- определить общую логическую схему обработки, определить дешифровочные признаки для отдельных элементарных классов земных покрытий и объектов сложных классов;
- выполнить демонстрационную классификацию объектов городской застройки в соответствии с TLCC номенклатурой классов;
- выполнить углубленную классификацию водных объектов в соответствии с требованиями конечного пользователя, разработать соответствующие модели и алгоритмы обработки;
- подготовить информационный продукт для конечного пользователя, пригодный для принятия управленческих решений.

Обобщенная логическая схема работ

Предложенная логическая модель обработки включала следующие группы операций:

1. Сбор данных.

В качестве основного источника данных ДЗЗ был использован многоспектральный снимок WorldView-2 за 2010-08-25. Снимок предоставлен Digital Globe в виде геоцентрированных панхромного и 8-канального спектрального изображений. Каждое изображение было поставлено в виде 9 отдельных тайлов площадью около 11 км². Характеристики спектральных каналов спутника WorldView-2 приведены в таблице 2.

В качестве вспомогательных данных были использованы:

- архивный снимок Quick Bird (2006-07-22) с нанесенными траекториями поплавков по данным предыдущих полевых обследований, выполненных Днепрогипроводхозом в 2009 г (рисунок 1);
- историческая (1945 г.) карта акватории Днепра, соответствующая гидрологическому режиму реки при отсутствии каскада плотин;
- современная лотия Днепра масштаба 1:10000;

– данные полевых обследований речной акватории с отбором проб воды и донных отложений.

2. Предварительная обработка данных включала:

2.1. Формирование единого файла (мозаики) из 9 исходных тайлов.

2.2. Повышение пространственного разрешения до уровня панхроматического канала 0,5 м.

Для этой операции была использована Gram-Schmidt spectral sharpening процедура. Для предварительного визуального анализа снимка изображение было трансформировано к близкой к реальной цветовой RGB гамме с использованием следующих формул:

Red = Band 5; Green = 2/3 * Band 3 + 1/3 * Band 7; Blue = 2/3 * Band 3 - 1/3 * Band 7

2.3. Привязку всех данных к единой системе координат.

Чтобы избежать дополнительных ошибок в интерпретации данных WorldView-2, за единую систему принята система координат поставленного нам снимка. Привязка проводилась для акватории и прибрежной зоны, в качестве опорных точек использованы стабильные элементы сцены в прибрежной зоне (углы зданий, пересечения дорог).

Таблица 2 – Основные технические характеристики спутника WorldView-2

Дата запуска: 8 октября 2009 года		
Режимы:	Панхроматический	Мультиспектральный
Спектральный диапазон (мкм):	0,5-0,9	голубой: 0,45-0,52 зеленый: 0,52-0,59 красный: 0,63-0,69 ближний ИК: 0,76-0,89 новые каналы: прибрежный: 0,423-0,453 желтый: 0,5-0,64 кромка красного: 0,7-0,73 ближний ИК: 0,9-1,05
Пространственное разрешение в надире:	50 см	1,8 м
Максимальное отклонение от надира:	40°	
Ширина полосы охвата:	16,4 км	
Точность геопозиционирования:	СЕ90 = 12,2 м	
Скорость передачи данных на наземный сегмент:	800 Мбит/сек	
Радиометрическое разрешение:	11 бит на пиксел	
Формат файлов:	GeoTIFF, NITF	
Обработка:	Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции	
Периодичность съемки:	1-4 дня (в зависимости от широты области съемки)	

2.4. Выбор информативных слоев изображения.

Чтобы избежать или уменьшить влияние случайных мешающих факторов, таких как атмосфера или освещенность, были использованы такие слои как текстура и межканальные индексы.

На основе предварительных классификационных испытаний для различных тестовых участков были предложены и апробированы дополнительно к первичным спектральным данным WorldView-2 устойчивые растровые слои:

- Variance – нормированный текстурный индекс Variance для информативных каналов WorldView-2;

- NDVI – нормализованный вегетационный индекс;

- NI I-J – нормализованный межканальный индекс, в данном случае межканальный индекс I и J каналов;

- WI – нормированный водный индекс (отношение суммы спектральных яркостей в первых трех каналов к сумме яркостей в 4 - 8 каналах);

- Road – векторный слой дорог.

Использование этих характеристик позволяет обеспечить полную или частичную инвариантность признаков к нежелательным аддитивным и мультипликативным искажениям, характерным для исходных спектральных яркостей.

2.5. Оценку геометрических смещений между отдельными спектральными каналами (так называемые межканальные смещения).

Для оценки были сравнены опорное панхромное изображение и контрольные спектральные изображения малых высококонтрастных объектов (автомобили в движении и на стоянке). Результаты сравнения оцениваются величиной межканального смещения на местности около 0,2 - 0,3 м для неподвижного объекта и до 4 - 5 м для движущегося объекта. Более детальную оценку межканальных смещений целесообразно провести на исходных снимках без проведения географической привязки.



Рисунок 1 – Снимок Quick Bird (2006-07-22) с нанесенными траекториями поплавок

2.6. Оценку относительной информативности отдельных спектральных каналов для таких типичных фрагментов сцены, как вода, городская застройка, промышленная зона, зеленая зона.

Для каждого из выбранных фрагментов сцены были определены его статистические характеристики:

- max, min, среднее значение, среднеквадратическое отклонение по каждому каналу;
- ковариационную матрицу (Cov), характеризующую исследуемый фрагмент сцены в пространстве первичных спектральных признаков;
- корреляционную матрицу (Cor), характеризующую в линейном приближении статистические парные связи между каналами;
- матрицу главных векторов E;

– собственные значения V_j ковариационной матрицы, которые соответствуют обобщенной дисперсии J -ой главной компоненты.

На основании этих данных суммарный вклад U_i i -го спектрального канала в общий объем информации можно представить в виде:

$$U_i = |E_{i1}| + \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} * |E_{i2}| + \dots + \sqrt{\frac{V_N}{V_1}} * |E_{iN}| \quad (1)$$

или в нормированном виде от 0 до 1:

$$\bar{U}_i = \frac{U_i}{\sum_{i=1}^N U_i} \quad (2).$$

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Относительная информативность спектральных каналов

	Band1	Band 2	Band 3	Band4	Band 5	Band6	Band7	Band8
Мутная вода с поверхностными загрязнениями	0.0006	0.0065	0.1135	0.0792	0.0536	0.3081	0.2508	0.1878
Мутная вода	0.0069	0.0576	0.1559	0.0816	0.0446	0.2961	0.2069	0.1505
Городская застройка	0.005	0.0118	0.0962	0.1398	0.1548	0.1733	0.1917	0.2275
Промышленная зона	0.0040	0.0106	0.0901	0.1440	0.1226	0.1603	0.2227	0.2458
Зеленая зона	0.0009	0.0044	0.0169	0.0270	0.0715	0.1943	0.2391	0.4460
Вся территория акватории	0.0002	0.0023	0.0231	0.0193	0.0185	0.2292	0.3258	0.3814

Таблица 3 показывает, что для всех фрагментов городской территории наиболее информативными являются 6, 7 и 8 спектральные каналы, которые и дают определяющий вклад в первые три главных компоненты. Вклад коротковолновых 1 и 2 каналов не превышает долей процента для первого канала и 1 - 6 % для второго канала. Вклад 3 - 5 каналов занимает промежуточное положение на уровне 2 - 16%.

С другой стороны, из ряда теоретических и прикладных работ [7 - 10] хорошо известно, что для морских и океанских вод информативными являются коротковолновые каналы, которые используются для определения концентрации взвесей или глубины мелководной зоны. Возможность использования коротковолновых каналов для описания мутных речных вод представлена в разделе 5 настоящей работы.

3. Классификация.

Для относительно однородных площадных объектов произвольной формы (преимущественно природного происхождения) таких, как "Леса и полуприродные области", "Заболоченные территории" или "Водные поверхности" основными дешифровочными признаками являются статистические характеристики многомерных полей спектральных яркостей или производные от них индексные характеристики. Поэтому классификацию подобных объектов возможно проводить на этапе предварительной обработки с использованием пиксел-ориентированных методов классификации, а именно метода максимального правдоподобия с обучением на тестовых участках, которые выбираются оператором. При этом в качестве дешифровочных признаков используется оптимизированный набор относительно устойчивых

нормализованных межканальных индексов типа NDVI.

Более общая и универсальная модель классификации основана на объектно-ориентированном анализе изображения (ОВИА). Объектно-ориентированный анализ основан на том положении, что важная семантическая информация, необходимая для интерпретации изображения, содержится не в каком-либо отдельном пикселе, а в значимом объекте изображения, представленном полигоном однородных пикселей, и во взаимных отношениях между объектами [11].

Многоуровневая сегментация изображения позволяет сконструировать иерархическую структуру объектов изображения, от больших объектов (на верхнем уровне) до мелких объектов, вплоть до объектов пиксельного размера на самом низком уровне. При этом каждый объект на любом промежуточном уровне состоит из субобъектов, расположенных на более низких уровнях и, в то же время, сам является субобъектом по отношению к объектам более высоких уровней (супер-объектам). Иерархические отношения "суперобъекты-объекты-субобъекты" являются важными дешифровочными признаками, например, при выделении объектов комплексных классов.

Процесс сегментации и последующей классификации может повторяться многократно, каждый раз со своим набором классов и новым набором признаков. Это открывает путь для многошагового процесса классификации, начиная от объектов простых однородных классов (типа чистая вода, лес, песок) и заканчивая объектами сложных и комплексных классов, например, городская застройка, смешанные леса, гетерогенные сельскохозяйственные области, порты и др.

Предлагаемая технология на этапе объектно-ориентированного анализа использует многоуровневую сегментацию со значениями параметра масштабности объектов, равными 100, 10, 5. Соответственно, сегментированные изображения были получены на следующих уровнях: p_{100} (большие объекты), p_{10} , p_5 (малые объекты). Для сегментации были использованы восемь спектральных каналов с весом 1. Для всех уровней сегментации коэффициент формы принят равным 0,1, коэффициент компактности – 0,5. Для анализа использованы дополнительные слои изображения: текстурные индексы "Variance" по пятому и восьмому спектральным каналам и первые две главные компоненты, рассчитанные по восьми спектральным каналам.

Дальнейший объектно-ориентированный анализ данных включает многошаговый процесс классификации:

1 шаг. Предварительная классификация сцены по набору вспомогательных классов.

2 шаг. Выделение элементарных объектов (примитивов) для сложных комплексных классов, например классов городской застройки 111 и 121.

3 шаг. Выделение объектов сложных комплексных классов в виде сборок примитивов в определенных пропорциях.

4 шаг. Окончательная классификация по заданной номенклатуре классов путем сборки на одном иерархическом уровне объектов различных классов.

Объектно-ориентированный анализ используется также и для постклассификации, что предполагает:

– слияние соседних объектов одного класса в один объект;

– генерализацию мелких (с площадями, меньше чем минимально-картируемая площадь объекта) соседних объектов разных классов в один объект по особым правилам, устанавливаемым пользователем;

– углубленную классификацию по критериям конечного пользователя.

В рамках данной работы была проведена классификация земных покрытий в соответствии с заданной общепринятой номенклатурой классов (121 Индустриальные и коммерческие модули, 122 Дороги и связанная земля, 134 Неиспользуемая земля, 31 Леса (деревья), 32 Кустарники и/или травяные ассоциации, 331 Пески, 333 Редко поросшие области, 41 Внутренние заболоченные земли, 51 Внутренние воды и дополнительный класс "Тени").

Необходимо отметить, что объекты класса "тени" играют важную технологическую роль в дальнейшем обнаружении высотных объектов (многоэтажные здания, высокие деревья, трубы, мосты, путепроводы), а в некоторых случаях позволяют идентифицировать целевое назначение объекта. Пример идентификации плавучего крана по его тени представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Идентификация плавучего крана по его тени

Для последующей углубленной постклассификации речной акватории была создана маска воды для всей сцены.

Для формирования маски воды использовались два файла: трансформированный много-спектральный снимок и панхромный снимок.

В маску воды включены объекты следующих классов:

Water 1 – чистая вода
 Water 2 – умеренно грязная вода
 Water 3 – вода с высоким содержанием водорослей, ряски, фитопланктона
 Water 4 – тени на воде
 Water 5 – мелкие предметы на воде
 Дешифровочные признаки классов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Дешифровочные признаки классов водных объектов

Наименование признака	Формула вычисления
$(b8-b5)/(b8+b5)$	$([Mean\ b8]-[Mean\ b5])/([Mean\ b8]+[Mean\ b5])$
$(b3-b1)/(b3+b1)$	$([Mean\ b3]-[Mean\ b1])/([Mean\ b3]+[Mean\ b1])$
$(b3-b5)/(b3+b5)$	$([Mean\ b3]-[Mean\ b5])/([Mean\ b3]+[Mean\ b5])$
$(b2-b7)/(b2+b7)$	$([Mean\ b2]-[Mean\ b7])/([Mean\ b2]+[Mean\ b7])$
$(b8-b7)/(b8+b7)$	$([Mean\ b8]-[Mean\ b7])/([Mean\ b8]+[Mean\ b7])$
$b3/b2$	$[Mean\ b3]/[Mean\ b2]$

В границах маски воды была проведена углубленная классификация водных объектов, характеризующая гидробиологическую ситуацию на речной акватории по следующим классам:

- Класс W1 (4 градации) – плотные поверхностные загрязнения водорослями, ряской, фитопланктоном. Объекты этого класса в основном приурочены к источникам загрязнений прибрежной зоны.

- Класс W2 (5 градаций) – мутная вода с элементами поверхностных загрязнений.

Эти элементы исполняют роль трассеров, которые характеризуют гидрологический режим течений, вихревых и застойных зон.

Класс W3 (2 градации) – относительно чистые воды.

Водные загрязнения представлены в виде 11 градаций (таблица 5) межканального индекса:

$$(2/3 * b3 - 1/3 * b7) / (2/3 * b3 + 1/3 * b7)$$

Результаты классификации и площадь каждого класса представлены на рисунке 3.

Таблица 5 – Решающие правила для классификации загрязнений воды

Класс	Подкласс	Градация
W1	W1-1	$-1 \leq x > -0.1$
	W1-2	$-0.1 \leq x > 0$
	W1-3	$0 \leq x > 0.1$
	W1-4	$0.1 \leq x > 0.2$
W2	W2-1	$0.2 \leq x > 0.3$
	W2-2	$0.3 \leq x > 0.4$
	W2-3	$0.4 \leq x > 0.5$
	W2-4	$0.5 \leq x > 0.55$
	W2-5	$0.55 \leq x > 0.6$
W3	W3-1	$0.6 \leq x > 0.65$
	W3-2	$0.65 \leq x > 1$

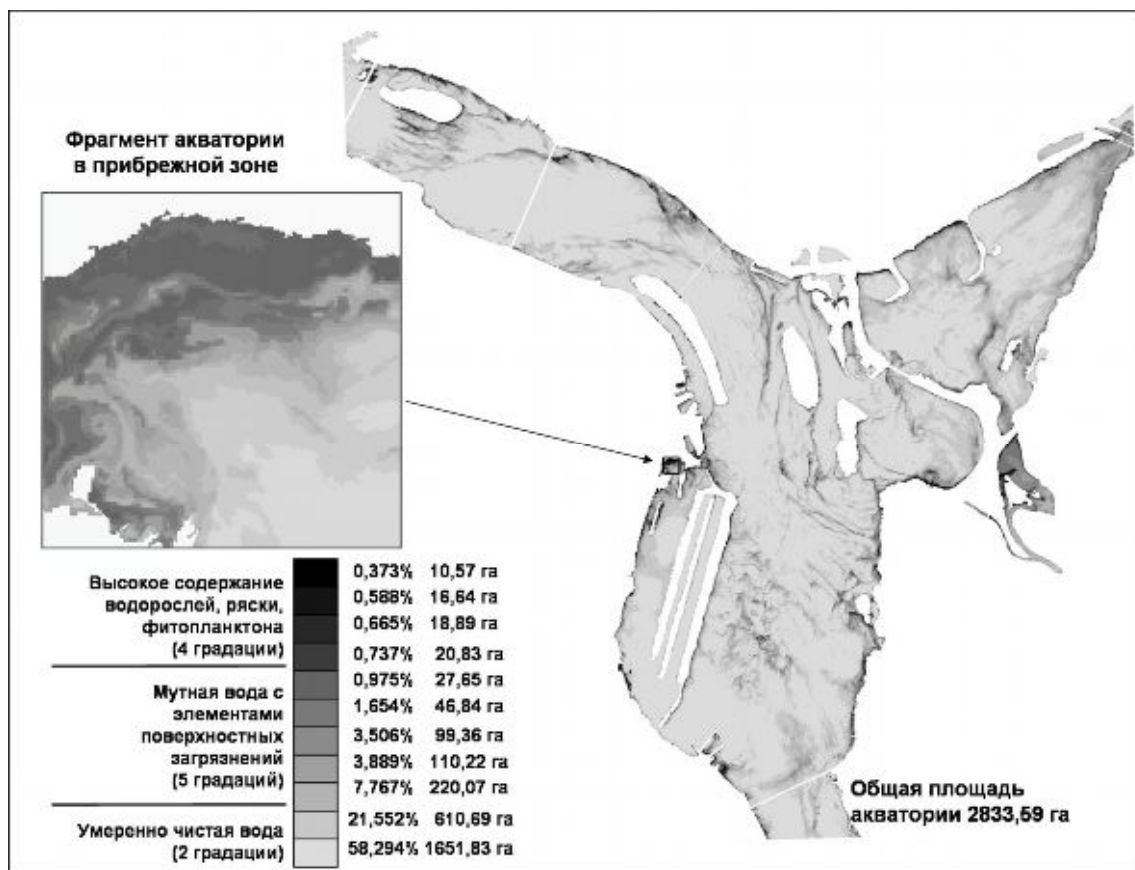


Рисунок 3 – Классификация загрязнений речной акватории в черте г. Днепропетровска по данным КА Worldview-2 за 25.08.2010 г.

Объект и задачи детальных исследований

Для детальных исследований была выбрана речная акватория рек Днепра и Самары. Актуальность таких работ обусловлена кризисным состоянием Днепра и его притоков по всему каскаду днепровских водохранилищ [12 - 14].

Днепровское водохранилище построено первым в каскаде водохранилищ. В центральной части г. Днепропетровска подъем воды осуществлен на 3,3-4,9 м. В результате создания водохранилища, и позднее каскада Днепровских водохранилищ, на его акватории начал наблюдаться ряд следующих негативных явлений:

1. Затопление больших территорий земель, в том числе в центральной части г. Днепропетровска на площади 1700 га (рисунок 4).

2. Волновая переработка берегов (абразия), которая привела к затоплению дополнительных земель и попаданию продуктов размыва в водохранилище. Интенсивность абразии в довоенные года оценивается в

20 м³/год на погонный метр берега, в послевоенные годы до 1964 г. – 9,5 м³/год, позднее снизилась до 5 м³/год.

3. Преобразование всей экосистемы реки из речной на озерно-речную с соответствующим замедлением водообмена и самоочищения воды.

4. Изменение гидрологического режима реки из природного на искусственный, зарегулированный, полное отсутствие таких фаз гидрологического режима, как весеннее половодье, летне-осенняя межень (рисунок 5).

5. Возникновение новых, неизвестных ранее, явлений гидрологического режима: суточное регулирование с резким изменением расходов, внутрисуточное изменение уровней воды, возникновение волн попуска и связанных с ними интерферентных волн, знакопеременных водообменных течений в устьях притоков и в заливах, значительная пульсация скоростей и направления течения (в 2 - 3 раза за короткие промежутки времени), обратные течения в завихрениях и т. д.

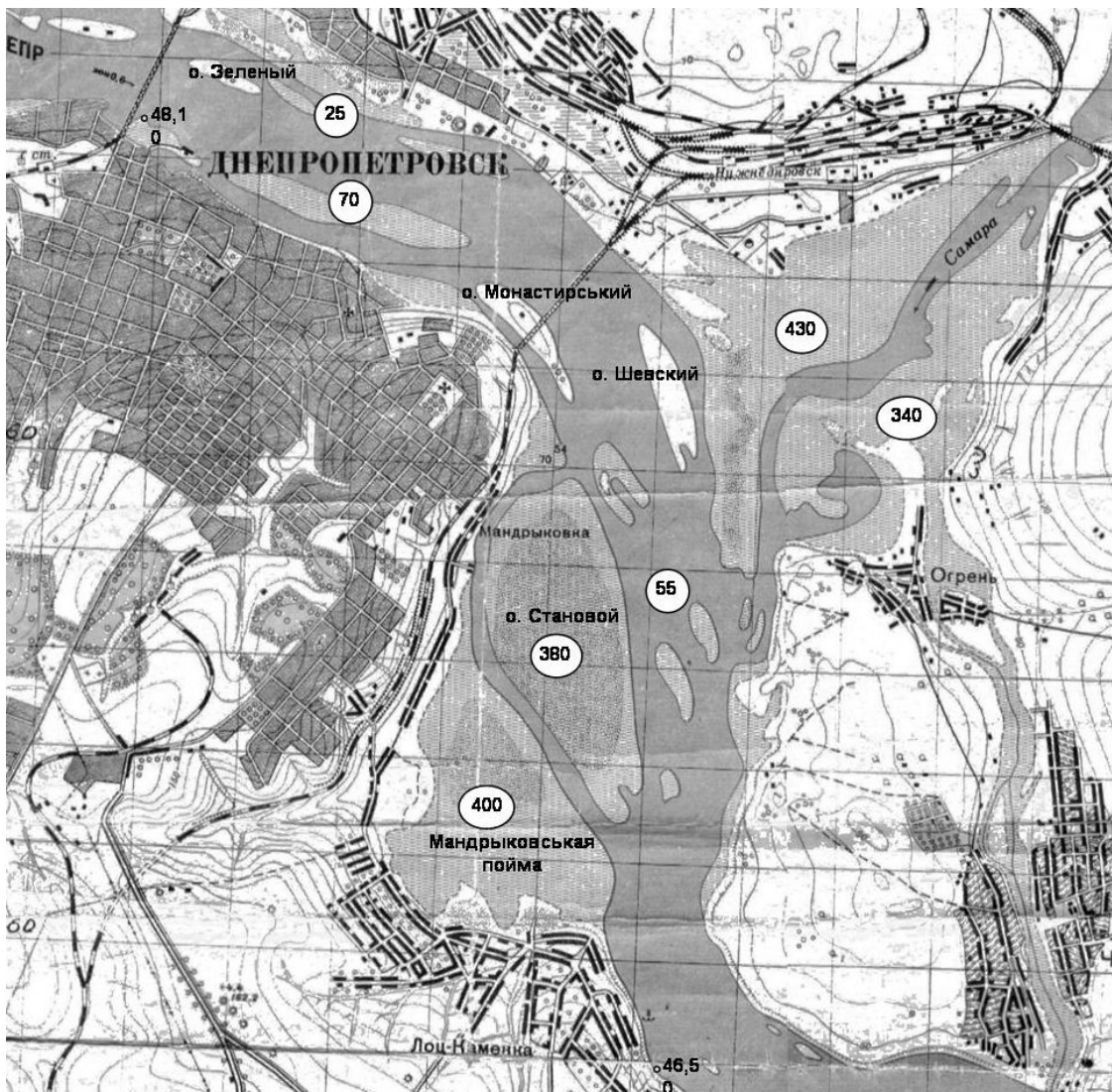


Рисунок 4 – План акваторії р. Дніпр в межах г. Дніпропетровська в 1945 г.
Числа в колах означають площу затоплених водохранилищем земель і островів в гектарах

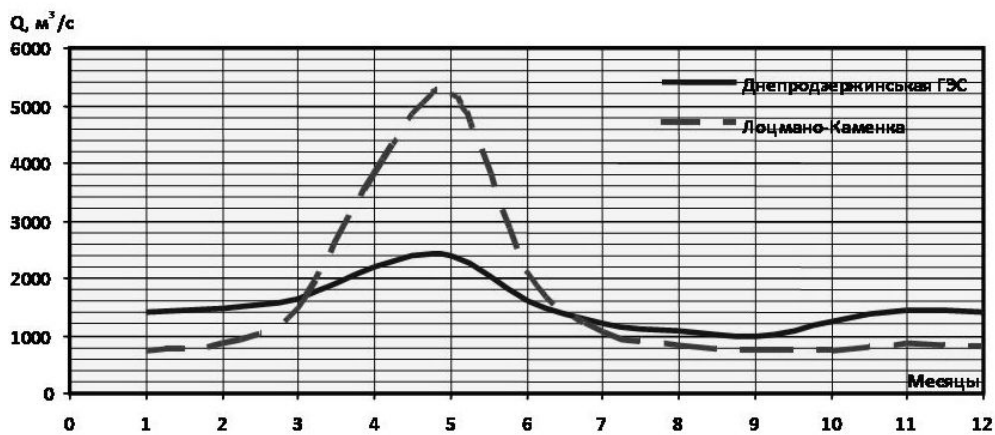


Рисунок 5 – Середньорічні гідрографи витрат води р. Дніпр до його зарегулювання (в/п Лоцмань-Каменка) і після (Дніпродзержинська ГЭС)

6. Мелководное затопление больших площадей (верхняя часть Самарского залива, внутренние водоемы Диевской поймы, залив Каменка и др.), на которых широко распространены такие явления, как монотипное зарастание тростниковой растительностью, заболачивание.

7. Возникновение застойных зон, где осуществляется интенсивное накопление донных отложений, илов, в том числе техногенных, связанных со сбросами промышленных предприятий, из ливневых коллекторов.

8. Интенсивное оседание наносов ливневых коллекторов в пределах города, которые раньше уносились течением, и интенсивное загрязнение ими речной воды.

9. Чрезмерное повышение температуры воды в летнее время и снижение ее в зимний период по сравнению с естественным речным температурным режимом. Средняя температура воды р. Днепр в июле возросла на 0,6° (с 22,8° до 23,4°), августа – на 0,9° (с 22,2° до 23,1°), продолжительность периода прогрева воды выше 22° возросла на 12 суток (с 50 до 62 суток). Особенно сильное перегревание воды возникает на мелководьях с недостаточным водообменом.

10. Увеличение продолжительности ледостава.

11. Чрезмерное развитие сине-зеленых водорослей в летний период, особенно при

перегревании воды выше 22° С. Средние показатели биомассы сине-зеленых водорослей за вегетационный период в верхних слоях воды составляют 9 г/м³, максимальные в пятнах (цветение) – 100 г/м³, что иногда приводит к полному поглощению кислорода в воде в ночное время и к заморным явлениям.

12. Скопление сине-зеленых водорослей вдоль берегов, в зарослях водной растительности с помощью дрейфовых течений под действием ветра, которое приводит к их разложению, появления гнилостного запаха, загрязнению воды.

13. Отсутствие мест рекреации (общественных пляжей) в пределах города через загрязнение воды, в первую очередь сине-зелеными водорослями.

14. Заиливание водохранилища, которое осуществляется неравномерно, начиная сверху, в первую очередь в застойных зонах.

Низкие скорости течения воды благоприятны для накопления загрязняющих веществ в донных отложениях, под действием как силы тяжести, так и химического связывания с определенными веществами. Источники загрязнения, содержащиеся в донных отложениях, остаются, тем не менее, биодоступными, усваиваются бактериями или растениями, в итоге загрязняют цепь питания, несмотря на то, что концентрация загрязняющих веществ в поверхностных водах остается на невысоком уровне.

Основные результаты

В настоящей работе основным объектом исследований была речная акватория. Поэтому для маски воды были опре-

делены статистические характеристики сцены, представленные в таблицах 6 – 8.

Таблица 6 – Основные статистические данные

Basic Stats	Min	Max	Mean	Stdev	Eigenvalue
Band 1	300	1244	365.8	41.72	64305.84
Band 2	220	1972	315.89	58.55	21487.07
Band 3	206	1999	393.06	101.16	1333.21
Band 4	157	2033	392.38	124.9	772.33
Band 5	83	1949	254.19	92.21	583.1
Band 6	109	2003	408.33	125.06	403.11
Band 7	71	1974	368.54	135.63	106.45
Band 8	57	1545	326.51	124.54	61.12

Таблица 7 – Корреляционная матрица

Correlation	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Band 1	1	0.96	0.92	0.9	0.86	0.56	0.22	0.17
Band 2	0.96	1	0.97	0.92	0.91	0.61	0.3	0.24
Band 3	0.92	0.97	1	0.95	0.96	0.73	0.44	0.38
Band 4	0.9	0.92	0.95	1	0.96	0.76	0.42	0.39
Band 5	0.86	0.91	0.96	0.95	1	0.73	0.44	0.38
Band 6	0.56	0.61	0.73	0.76	0.73	1	0.86	0.85
Band 7	0.22	0.3	0.44	0.42	0.44	0.86	1	0.95
Band 8	0.17	0.24	0.38	0.39	0.38	0.85	0.95	1

Таблица 8 – Матрица собственных векторов

Eigenvector	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8
Band 1	0.11	0.17	0.33	0.42	0.3	0.48	0.44	0.39
Band 2	0.19	0.25	0.35	0.44	0.32	-0.11	-0.49	-0.48
Band 3	-0.09	-0.25	-0.42	0.35	-0.14	0.54	-0.54	0.17
Band 4	-0.1	-0.21	-0.23	0.13	-0.002	0.32	0.47	-0.74
Band 5	-0.36	-0.35	-0.26	0.13	0.74	-0.32	0.03	0.13
Band 6	-0.26	0.03	0.28	-0.65	0.35	0.5	-0.23	-0.11
Band 7	0.58	0.4	-0.58	-0.22	0.34	0.08	0.02	-0.001
Band 8	-0.63	0.72	-0.23	0.12	-0.08	-0.02	0.03	-0.01

Совместный анализ таблиц 3 и 6 - 8 позволяет определить наиболее информативные спектральные каналы и производные от них индексные параметры, описывающие тонкие различия в оптических характеристиках водных масс. К ним относятся:

- Band 8 – канал с наибольшим *Stdev* и наибольшим вкладом в первую главную компоненту PC1;
- Band 1 – канал с наименьшей парной корреляцией с каналом Band 8;
- Band 6 – канал с наименьшей парной корреляцией с каналом Band 1 и умеренной корреляцией с каналом Band 8;
- главные компоненты PC4, PC5, PC6.

Результат такого выбора представлен на рисунке 6.

На рисунке 6 хорошо отображается общая гидробиологическая ситуация речной акватории: прибрежные очаги плотных поверхностных загрязнений, струи загрязнений (трассеры) на открытой акватории, характеризующие направление их движения под совместным влиянием течения и ветра. Следует отметить, что на дату и время проведения съемки ветер был западный, скорость ветра составляла 5 м/с. Скорость течения по дан-

ным поплавковых измерений составляет 0.1 - 0.5 м/с. Обращает внимание сложная нерегулярная структура трассеров в нижней части снимка, что, по-видимому, обусловлено крайне изменчивым рельефом дна в этой зоне.

В целом, ситуация, отображенная на рисунке 6, качественно совпадает с классификационной картой, представленной на рисунке 3, что подтверждает объективность полученных результатов.

На основе обработанных спутниковых снимков и с привлечением дополнительных данных была разработана схема современной гидрологической ситуации речной акватории, на которой выделены застойные зоны с активным заиливанием акватории, направления стоковых и водообменных течений, зоны водоворотов и завихрений.

Результаты обработки снимка WorldView-2, созданная карта гидрологической ситуации и дополнительные полевые обследования с отбором проб воды и донных отложений были использованы специалистами Днепрогидропроводхоза для создания конечного информационного продукта – инженерного плана реконструкции речной акватории в зоне Днепропетровска, который представлен на рисунке 7.

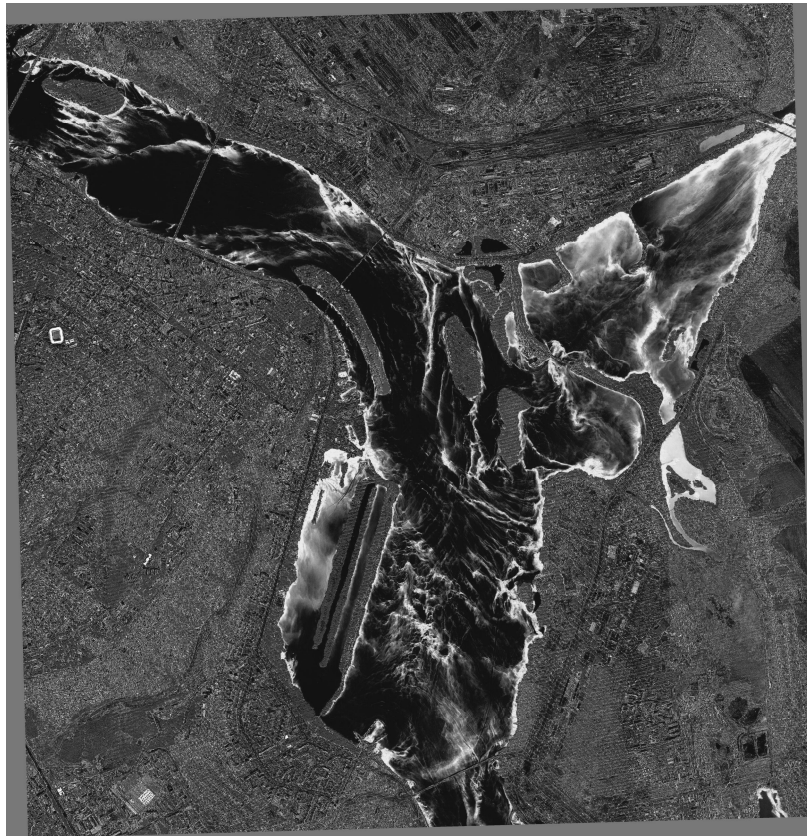


Рисунок 6 – RGB-синтез 5, 6 и 4 главных компонент.

Дополнительно применена линейная растяжка сигнала в диапазоне яркостей (DN), соответствующая участку мутной воды с элементами поверхностного загрязнения (класс W2)

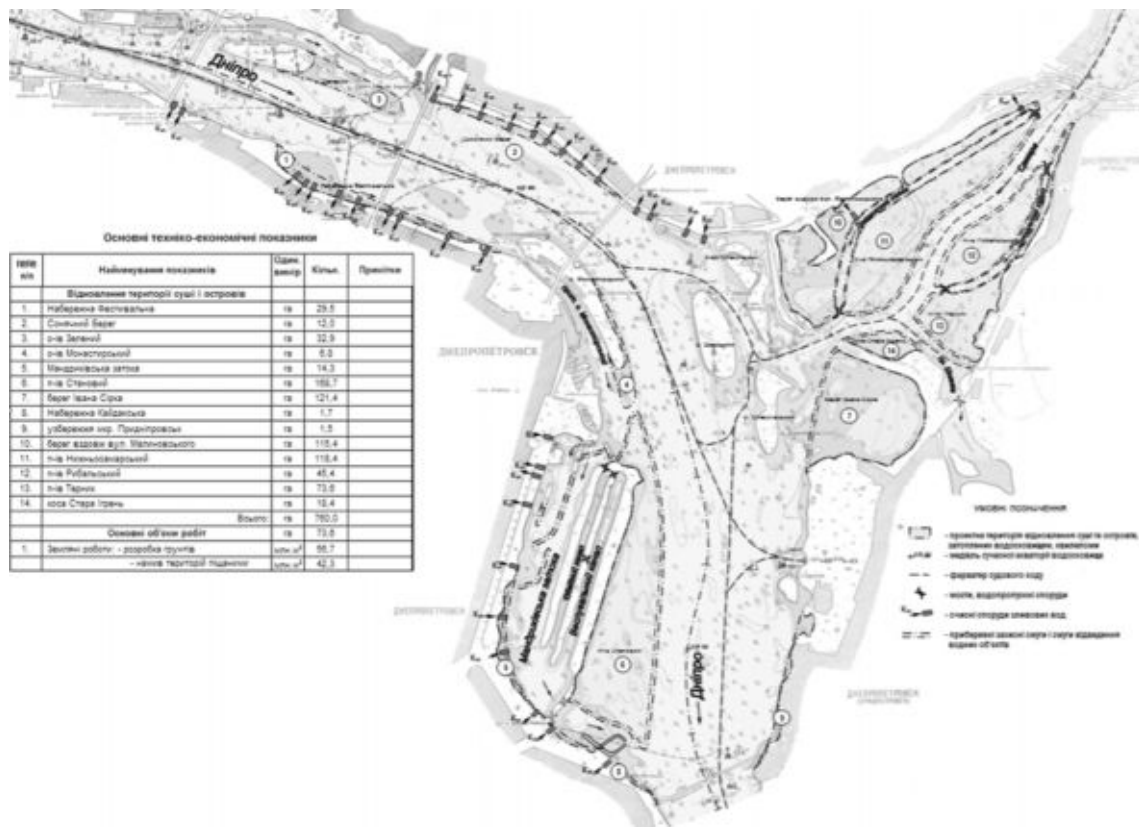


Рисунок 7 – Інженерний план реконструкції річкової акваторії в зоні г. Дніпропетровська

Основные мероприятия, которые предусмотрены инженерным планом:

1. Ликвидация застойных зон активного заиливания водохранилища в пределах г. Днепропетровска на площади 760 га.

2. Восстановление затопленных водохранилищем полос вдоль берегов методом намыва для размещения площадок очистных сооружений ливневых вод, улучшения проточности вдоль берегов, прекращения накопления илов и образование территорий для организации прибрежных защитных полос общей длиной 12,0 км, шириной 25 – 200 м, на площади 59,0 га.

3. Устройство локальных очистных сооружений в устьях всех ливневых коллекторов, которые впадают в р. Днепр на территории проектной деятельности, всего 41 шт.

4. Расчистка заиленных участков протока между левым берегом и о. Зеленый и намыв территории о. Зеленый с нижней стороны на площади 32,9 га, что позволит увеличить проточность вдоль левого берега (вдоль мкр. Воронцовский) и защитит от заносов песком устья дренажно-паводкового канала Гнилокиш.

5. Продление (намыв) о. Монастырский вниз по течению, а также встречное продление Мандрыковской косы вверх против течения, длиной 0,23 км и 0,78 км соответственно для обеспечения направления потока воды из протоки о. Монастырский в Мандрыковский залив. Между косами остается водопропускное отверстие шириной 80 м для прохода маломерных судов.

6. Разборка существующей дамбы в верховье кос гребных каналов Мандрыковского залива длиной 200 м, устройство струенуправляющих дамб-волноломов по центру залива длиной 1,40 км, что обеспечит омывание западного берега (где расположены устья 8-ми ливневых коллекторов) потоком воды из протоки о. Монастырский. Дамб-волноломы будут также защищать воднолыжный стадион от волновых воздействий.

7. Устройство водопропускных сооружений Мандрыковского залива в составе:

- шлюзового сооружения размером отверстия 5 x 3,5 м с мостовым переходом в голове обводного канала для обеспечения

проточности и водообмена в гребном и обводном каналах;

- двух водопропускных технологических сооружений мостового типа между обводным и гребным каналами пролетами 24 м для обеспечения водообмена в каналах и прохода спортивных судов;

- низового водовыпускного сооружения мостового типа пролетом 3 x 24 м для обеспечения сквозной проточности залива. Существующее мостовое сооружение пролетом 3 x 12 м не обеспечивает достаточной проточности.

8. Восстановление затопленной суши:

- территории бывшей Мандрыковской поймы, где сейчас преобладает застойный режим, методом намыва между природным руслом р. Днепр и внешней косой Мандрыковского залива на площади 168,7 га;

- в непроточном заливе по левому берегу ниже Усть-Самарского моста (берег Ивана Сирка), который сейчас заиливается, на площади 121,4 га;

- вдоль берегов р. Самара на акватории Усть-Самарского плеса Самарского залива на площади 371,2 га, который постепенно заиливается и зарастает водной растительностью. Предполагается восстановление затопленного русла р. Самара, где глубины наибольшие (5,6 - 9,5 м), в виде протока шириной 250 м. Вдоль левого и правого берегов плеса предусмотрено устройство дренажных каналов шириной 100 м с водопропускными сооружениями в верховье и в устье. Перед Усть-Самарским и Игреньским мостами с низовой стороны предусмотрены расширенные участки русла р. Самара для облегчения прохода на нерест рыбы при встречном течении.

Расчистка мелководных участков в северной части Главного плеса Самарского залива, который значительно улучшит его экологическое состояние и позволит получить достаточное количество грунта для намыва возобновляемых территорий. Расчистку предполагается выполнить не сплошь по площади, а по типу плавневой системы, путем образования протоков шириной до 100 м между мелями, зарослями тростника. Верхний слой заиленных грунтов используется для образования островов под защитой тро-

стниковых зарослей, нижний качественный песчаный грунт – для намыва территорий. Средний слой выемки песков на площади 600 га составляет 4,5 м, общая площадь улучшения экологического состояния залива путем расчистки – 940 га.

9. Берегоукрепление всех восстановленных территорий габионными конструкциями по типу вертикальных набережных, общей длиной 32,0 км.

В результате реализации предложенных мер ожидается следующее улучшение экологического состояния р. Днепр:

1. Средняя скорость течения воды в русле р. Днепр в пределах города возрастет на 15 – 20 %, что сделает режим течений более речным, промывным, увеличится насыщение воды кислородом.

2. Уменьшится прогревание воды в летнее время за счет увеличения водообмена и ликвидации мелководий с застойными режимами течений, что в определенной мере уменьшит развитие сине-зеленых водорослей.

3. Сквозная проточность в Мандрыковском заливе обеспечит в нем 500-кратный годовой водообмен, что значительно улучшит санитарное состояние воды и будет содействовать развитию здесь современной Олимпийской базы Украины водных видов спорта для подготовки спортсменов и проведения соревнований международного класса.

4. Очищение ливневых стоков уменьшит ежегодные сбросы в р. Днепр твердого стока и плавающего мусора из ливневых коллекторов объемом 5200 т/год, нефтепродуктов – 5,2 т/год. В результате очищения стоков средняя концентрация взвешенных веществ в воде уменьшится на 0,2 %, а вдоль берегов – на 20 %.

5. Восстановление затопленных водохранилищем прибрежных земель и островов на площади 760 га позволит создать нормаль-

ные, не зауженные искусственно прибрежные защитные полосы и полосы отвода вдоль берегов водоемов на площади 184,7 га (24,3 % всей восстановленной территории), разместить на восстановленных участках площадки ливневых очистных сооружений, большая площадь земель может быть использована в социальных программах.

6. Предполагается рекультивация растительным грунтом и озеленение прибрежных защитных полос на площади 145 га.

7. Принятый тип берегоукрепления габионными конструкциями с пологими подводными откосами позволит прекратить береговую абразию и предусматривает создание вдоль всех берегов мелководной полосы шириной 5 м на общей площади 21 га. С учетом существующих мелководий их общая площадь в пределах инженерного плана составит 308 га (14,5 %).

8. Защита от подтопления возобновляемых и сопредельных с ними территорий предусматривается путем устройства открытых дренажных каналов длиной 5,0 км и закрытого дренажного коллектора длиной 2,5 км;

9. Выборочная расчистка мелководных участков Самарского залива в виде глубоких проток между мелководьями и островами позволит уменьшить ее сплошное обмеление, зарастание и заболачивание на площади 600 га, средняя глубина залива возрастет с 2,3 м до 3,2 м, а на участках расчистки – с 1,6 м до 4,1 м, что значительно улучшит ее экологическое состояние, рыбо- и биопродуктивность.

10. В пределах пойменно-островной системы в районе Алексеевских островов, как наиболее ценной в экологическом состоянии территории (наличие редких охраняемых видов растений и животных – птиц, рыб, млекопитающих), рекомендовано создание гидрологического заказника на площади 80 га.

Выводы

1. Данные дистанционного зондирования Земли являются главным источником объективной пространственной информации. Среди большого набора этих данных от различных спутников данные WorldView-2 занимают лидирующие позиции, особенно для ис-

следований урбанизированных территорий и решения разнообразных тематических задач в области экологии, коммунального хозяйства, строительства, транспорта и связи.

2. Предлагаемая технология автоматизированной обработки спутниковых данных

реализуется программными средствами ENVI и Definiens и позволяет создавать информационные продукты, пригодные для принятия управленческих решений. При этом наиболее эффективным способом решения тематических задач является творческое сотрудничество специалистов в области обработки данных дистанционного зондирования и профильных специалистов в соответствующей тематической области.

3. На основе данных спутников World View-2, Quick Bird и дополнительных полевых обследований создан конечный информационный продукт в виде инженерного плана реконструкции Днепровского водохранилища в зоне г. Днепропетровска с обоснованными проектными решениями относительно объемов строительных работ и оценками ожидаемого эффекта.

Признательность

Авторы хотели бы поблагодарить фирму DigitalGlobe за организацию конкурса «First DigitalGlobe 8-Band Research Challenge» и предоставленный снимок, а также г. Ian Gilbert за постоянное внимание к участни-

кам конкурса. Спасибо также управлению экологии Днепропетровской мэрии и лично Н. Переметчику за выбор актуальной темы для детальных исследований.

Перелік посилань

1. Büttner G., Feranec J., Jaffrain G., Mari L., Maucha G., and Soukup T. The CORINE Land Cover 2000 Project. *EARSeL eProceedings* 3(3), 2004. - P. 331–346.
2. Bossard M., Feranec J., Otahel J. The revised and supplemented Corine Land Cover nomenclature. // Technical report EEA, No 38. February 2000, 110 p.
3. The thematic accuracy of Corine land cover 2000. Assessment using LUCAS (land use/cover area frame statistical survey). Technical report No 7/2006. // European Environment Agency: Copenhagen, Denmark. 2006. – 85 p. www.eea.europa.eu
4. Проект INTAS по разработке автоматизированной технологии классификации земных покрытий: научные задачи, основные результаты и перспективы ISSN 1561_8889 / Л. Бродский, Е.И. Бушуев, В.И. Волошин [и др.] // *Космічна наука і технологія*. – 2009. – Т. 15, № 2. – С. 36–48.
5. ITT Corporation. Environment for Visualization of Images (ENVI). (<http://www.ittvis.com>)
6. Definiens AG. Definiens Professional. <http://www.definiens.com>
7. Оптические методы спутниковой гидрофизики. Исследование окружающей среды с автоматических ИСЗ / [Б.А. Нелепо, Г.А. Гришин и др.]. – К. : Наукова думка, 1986. – 160 с.
8. Оптика океана / [В.И. Буренков, А.П. Васильков, К.С. Шифрин и др.]. – АН СССР, 1983. – 371 с.
9. Michael J. Loomis Depth Derivation from the Worldview-2 Satellite Using Hyperspectral Imagery. Master's Thesis, 2009. – 69 p.
10. Digital Globe. The Benefits of the 8 spectral bands of Worldview-2. White Paper, 2009, www.digitalglobe.com
11. Navulur K. Multispectral Image analysis using the object-oriented paradigm. – N.Y.: CRC Press, 2007. – 166 p.
12. Национальная программа экологического оздоровления бассейна Днепра и улучшения качества питьевой воды, утвержденная постановлением Верховной Рады Украины от 27 февраля 1997 г. за № 123/ 97-ВР.
13. А.Г. Шапарь Только стонет, но уже не ревет // *Екологія і природокористування*. – 2010. – Вип. 13. – С. 6–14.

14. Шматков Г.Г. Днепр: прошлое, настоящее и будущее. "Быть или не быть..." Днепру? Вот а чем вопрос! // Екологія і природокористування. – 2010. – Вип. 13.– С. 15–20.

*D.Burnis**, *Ye Bushuyev***, **AUTOMATED TECHNOLOGY OF URBAN AREAS**
*V.Voloshyn***, *V. Dem'yanov**, **CLASSIFICATION**
*O.Parshyna***, *V.Sablina***, **USING THE WORLDVIEW-2 DATA**
*A.Hudoteplyj***

**State regional project-research institute "Dnieprohyprovodhoz", Dnipropetrovsk*

***State Company "Dniprokosmos", Dnipropetrovsk*

The launch of the WorldView-2 satellite opens new opportunities in development of methods of the Land Cover automated classification, thanks to a wide set of spectral bands and the high spatial resolution.

This paper accounts for processing logic model and corresponding automated technology of Land Cover classification with use of WorldView-2 data. According to the call the water area of the Dnieper and Samara rivers in a zone of Dnipropetrovsk have been chosen as the basic object for carrying out of detailed researches. As a result of processing, thematic maps of a hydrological situation and pollution (3 classes, 11 subclasses) are received. On the basis of these maps and additional ground inspections the engineering plan of reconstruction of water area with the proved estimations of construction work volumes is developed.

Надійшла до редколегії 16 лютого 2011 р.

Рекомендовано членом редколегії канд. біол. наук О.О. Скрипником