

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ ИЗ КОСМОСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

**А.В. Абросимов** (Компания «Совзонд»)

В 1992 г. окончил географический факультет Удмуртского государственного университета по специальности «география». Работал руководителем вузовско-академической лаборатории Курганского государственного университета и Института географии РАН. В настоящее время — заместитель главного инженера компании «Совзонд». Кандидат географических наук.

**Б.А. Дворкин** (Компания «Совзонд»)

В 1974 г. окончил географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по специальности «картография». Работал в ПКО «Картография», ООО «Картография Хубер», ГИС-Ассоциации, Научном геоинформационном центре РАН. С 2008 г. по настоящее время — аналитик компании «Совзонд». Кандидат географических наук.

Эффективное управление водными ресурсами, проблемы рационального водопользования и оценки качества воды являются приоритетными задачами многих международных проектов. В России водохозяйственным вопросам также уделяется большое внимание, в том числе и на государственном уровне. Принятый в 2006 г. Водный кодекс РФ регулирует всю деятельность в сфере водных ресурсов. Водное законодательство России основывается на принципе значимости водных объектов в качестве основы жизнедеятельности человека и регулируется, исходя из представления о водном объекте как о важной составной части окружающей среды, как о природном ресурсе и, одновременно, как об объекте права собственности и иных прав.

Особенностью большинства естественных и искусственных водных объектов (реки, озера, каналы, водохранилища и т. д.) является их фактическая площадь и протяженность, а также неравномерное размещение на всей территории страны. Очевидно, что наличие информации об их точном местоположении,

взаимовлиянии и динамике изменений существенно влияет на качество принимаемых решений в сфере управления водным хозяйством.

Россия — одна из наиболее богатых природными водами стран мира. Суммарные естественные ресурсы и запасы пресных вод РФ оцениваются в 7770,6 км<sup>3</sup> в год. На территории России находятся 2,5 млн рек, 2,7 млн озер, 2290 водохранилищ, объемом свыше 1 млн км<sup>3</sup>, 30 тыс. малых водохранилищ и прудов. Основное значение для водопользования имеют возобновляемые ресурсы речного стока, которые обеспечивают около 90% потребности в водных ресурсах населения и хозяйственного комплекса страны и оцениваются в размере 4279 км<sup>3</sup> в год, и пресные подземные воды со статическим запасом воды свыше 15 тыс. км<sup>3</sup>. В России создан водохозяйственный комплекс, состоящий из 65 тыс. объектов. Они включают около 30 тыс. гидротехнических сооружений, регулирующих речной сток водохранилищ и прудов общим объемом более 800 км<sup>3</sup>, 37 систем межбассейнового перераспределения вод-

ных ресурсов по каналам общей протяженностью около 3 тыс. км и объемом стока, перебрасываемого в дефицитные районы, более 17 км<sup>3</sup> в год.

Среди основных целей деятельности водохозяйственного комплекса страны можно выделить следующие:

— обеспечение мероприятий по рациональному использованию, восстановлению и охране водных объектов, предупреждению и ликвидации вредного воздействия вод;

— эксплуатацию водохранилищ и водохозяйственных систем комплексного назначения, защитных и других гидротехнических сооружений, обеспечение их безопасности;

— разработку схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, водохозяйственных балансов и составление прогнозов состояния водных ресурсов и перспективного использования и охраны водных объектов;

— обеспечение разработки и осуществления противопаводковых мероприятий, мероприятий по проектированию и установлению водоохраных зон водных объектов и их прибреж-

ных защитных полос, предотвращению загрязнения вод.

Вполне очевидно, что водное хозяйство — это сфера, в которой использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и геоинформационных технологий трудно переоценить.

С помощью данных ДЗЗ и программных комплексов по их обработке можно решать многие важные задачи, в том числе такие как:

- инвентаризация водохранилищ и других водных объектов;

- постоянные наблюдения за состоянием дамб и других водозащитных и гидротехнических сооружений;

- оценка экологического состояния водных объектов, в том числе выявление загрязненных в результате аварийных сбросов и разливов вредных веществ участков водоемов, выявление источников загрязнения;

- изучение русловых процессов и картографирование микрорельефа дна на мелководье;

- прогнозирование и оперативный мониторинг наводнений, моделирование процессов затопления территории в результате наводнений;

- мониторинг состояния водохранных зон, несанкционированного строительства в их

пределах промышленных и жилых объектов;

- разрешение судебных споров, связанных с водопользованием и нарушениями Водного кодекса РФ;

- определение биологической продуктивности водоемов, выявление водных биоресурсов, решение рыбоводческих задач и многие другие.

Как видно из приведенного перечня задач, для их решения, в большинстве случаев, необходимо получать данные ДЗЗ из космоса постоянно, с заданным периодом наблюдений.

#### ▼ **Спутниковые системы мониторинга**

Подчеркивая, что отдельные циклы мониторинга водных объектов можно реализовать на базе данных ДЗЗ с разных космических аппаратов (КА), отметим черты, которые должны быть присущи мониторинговой системе:

- максимально возможная (желательно ежедневная) периодичность съемки (может достигаться за счет особенностей орбиты, отклонения съемочной аппаратуры от надира, широкой полосы захвата);

- возможность осуществления съемки на заказ, когда заказчик определяет конкретный объект и дату съемки;

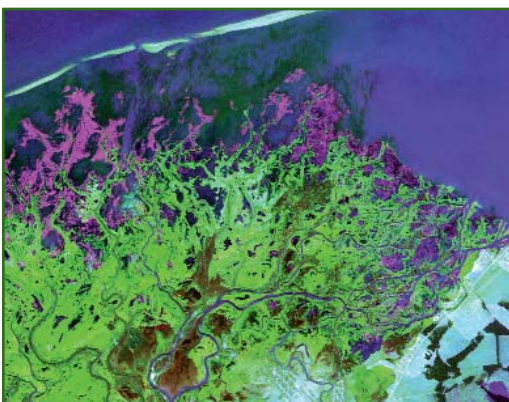
- наличие мультиспектральной съемочной системы для качественной оценки состояния водной массы и мониторинга водоохранной зоны.

Таким условиям в настоящее время отвечают три спутниковые системы: КА Terra и Aqua с радиометром MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и группировка из пяти спутников RapidEye [1].

Для решения задач экологического мониторинга крупных водных объектов вполне подходят данные, получаемые с радиометра MODIS, которые находятся в свободном доступе, бесплатно и практически в режиме реального времени распространяются Геологической службой

США в сети Интернет. Радиометр MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и дальнем инфракрасном диапазонах и регулярно выполняет съемку любых территорий с пространственным разрешением 250 м, 500 м и 1 км. Для решения задачи оценки качества воды наиболее информативной является сине-зеленая область спектральных каналов MODIS. Низкое пространственное разрешение ограничивает широкое применение данной системы. Она пригодна только для мониторинга крупных водоемов и масштабных процессов, происходящих в них.

Лучший, на наш взгляд, выбор в плане мониторинга — использование группировки из пяти спутников RapidEye, которая позволяет выполнять съемку одного и того же района Земли с периодичностью 24 ч, покрывая ежедневно съемкой территорию площадью 4 млн км<sup>2</sup>. Маневренность аппаратов, большие площади съемки, возможность ежедневного мониторинга, а также высокое пространственное разрешение (до 5 м) и широкая полоса съемки (77 км) делают использование данных, полученных от группировки спутников RapidEye, особенно перспективными для задач мониторинга в разных отраслях, включая водное хозяйство. Съемочные системы спутников, кроме четырех традиционных мультиспектральных каналов, располагают еще одним — «крайним красным» (0,69–0,73 мкм), что еще больше расширяет возможности применения этих снимков для мониторинга. Кроме того, высокое разрешение позволяет осуществлять мониторинг не только водной массы, но и береговых процессов, вплоть до локальных источников загрязнения. Так, например, мультивременной композит снимков RapidEye, приведенный на



**Рис. 1**

Мультивременной композит снимков RapidEye с 24.05.2009 г. по 16.07.2009 г. дельты реки Селенга (Республика Бурятия; бассейн оз. Байкал)

рис. 1 отражает изменения в отложении влекомых наносов и распространении тростниковых зарослей в дельте реки Селенга.

Перспективен комплексный подход к мониторингу водоемов для решения практических задач с применением данных ДЗЗ. В качестве примера можно рассмотреть возможность решения задачи выявления основных техногенно-спровоцированных изменений водной массы и водосбора водоема-охладителя атомной электростанции.

С помощью данных космической съемки высокого разрешения, например, с КА GeoEye (пространственное разрешение в мультиспектральном режиме 1,6 м), решается задача подробной и актуальной фиксации объектов и явлений на интересующей территории, в частности, четкое определение положения береговой линии водохранилища в меженный период, точное установление площадных и линейных параметров водоема, выявление мелких по размерам, но важных, природных (овраги, промоины, карстовые западины, перелески, луговины и т. п.) и антропогенных (карьеры, ямы, свалки, фермы, строения, сады, лесополосы, пруды и т. п.) объектов в пределах бассейна. Повторяющиеся данные с космических аппаратов среднего разрешения Landsat и Terra/ASTER, а также низкого разрешения (радиометр MODIS) за несколько лет позволят изучить термический режим водоема и, на основе этого, создать подробные карты и временные модели распределения температур по поверхности водохранилища (рис. 2). На рис. 2а отчетливо заметен сброс теплых вод в юго-восточной части водохранилища, где располагаются энергоблоки АЭС.

Данные ДЗЗ RapidEye обеспечивают изучение и картографирование распределения процессов эвтрофирования и распространения механического загрязнения, а также мониторинг состоя-

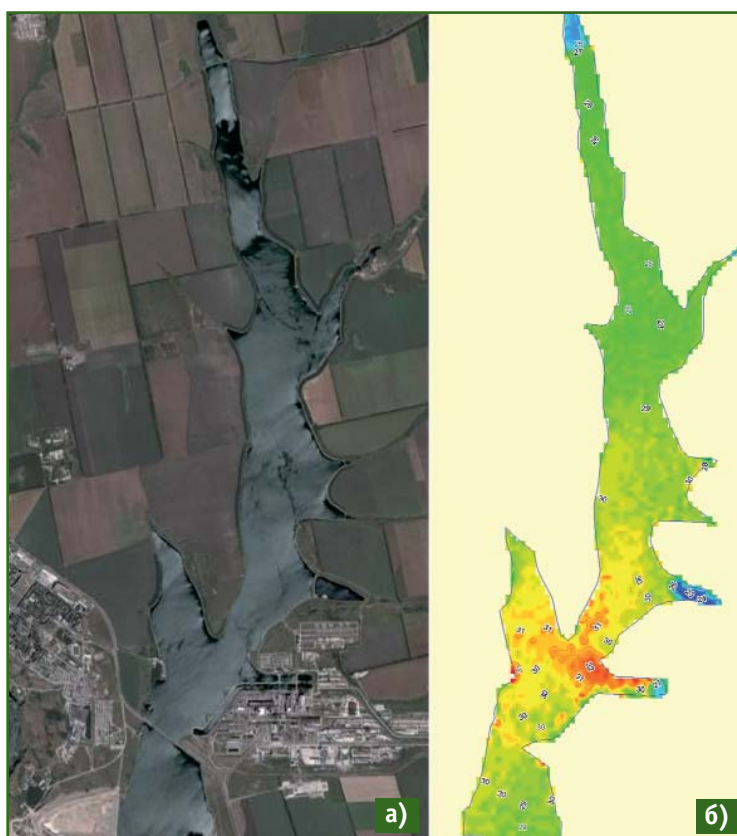
ния водоохранной зоны. Цифровые модели местности SRTM позволяют изучить процессы, происходящие в пределах водосборного бассейна, обеспечивающего водохранилище, послужат базой для картографирования стока, развития овражной эрозии, определения рисков заиления, засоления водоема и т. д.

Остановимся подробнее на использовании данных ДЗЗ из космоса при решении задач, представляющих, на наш взгляд, наибольший интерес.

#### ▼ Инвентаризация водохранилищ и других водных объектов, мониторинг изменения их границ

Дешифрирование космических снимков с целью локализации водных объектов обеспечивает точное проведение границ

раздела «вода — суша». Это достигается за счет использования некоторых особенностей отображения водной поверхности на снимках. Вот несколько примеров. В видимом диапазоне спектра вода имеет более высокий коэффициент поглощения, а значит, на дневных снимках водные поверхности темнее, чем суша. В ближнем инфракрасном диапазоне отражательная способность воды ниже, чем в видимом, поэтому индекс вегетации NDVI для воды имеет отрицательные значения. Следует, однако, оговориться, что не все так просто. В водной массе многих озер и рек, несущих большие объемы аккумулятивного материала, присутствует значительное количество взвешенных органических и минеральных частиц, что приводит к разнообра-



**Рис. 2**

*Ташлыкский водоем-охладитель Южно-Украинской АЭС (Украина, Николаевская область):*

*а) улучшенное цветное изображение в естественных цветах с разрешением 0,6 м на снимке с КА QuickBird от 06.07.2006 г.; б) температурные поля поверхностного слоя воды, построенные по тепловому каналу снимка с КА Landsat*





**Рис. 3**  
Нижнесвирская ГЭС на мозаике ОРТОРЕГИОН  
(реальное разрешение)

зию отраженных яркостей от акваторий различных водоемов, а также внутри акватории одного водоема, к «размыванию» береговой линии и, соответственно, к усложнению процесса дешифрирования.

Традиционно береговые линии водоемов определялись однократно в меженный период при обновлении картографической продукции. Космическая съемка позволяет не просто выполнить разовое установление границы водоема, но и осуществлять регулярное определение положения береговой линии водохранилищ и других водных объектов, отслеживать все изменения конфигурации водного зеркала с заданной степенью периодичности.

Перспективными для этих целей с точки зрения «цена — качество» являются данные с КА ALOS (Япония) [2]. Картографическая камера PRISM, которая установлена на спутнике, состоит из трех объективов, направленных «вперед», «в надин» и «назад» и обеспечивающих получение трех отдельных изображений с пространственным разрешением 2,5 м и шириной полосы съемки до 35 км. Наиболее революционным параметром, выделяющим эту съемочную систему среди других, является

высокая точность ортотрансформирования снимков по орбитальным данным, без использования данных о наземных опорных точках. Использование только RPC-коэффициентов, описывающих элементы внешнего ориентирования камеры и поставляемых вместе со снимками, позволяет получать ортотрансформированные изображения земной поверхности со средней квадратической погрешностью не хуже 10 м, что вполне удовлетворяет задачам создания и обновления топографических карт в масштабе до 1:25 000.

В настоящее время фотограмметрическая группа компании «Совзонд» завершила работы по созданию ортотрансформированной мозаики ОРТОРЕГИОН на большую часть территории Российской Федерации с разрешением 2,5 м и 10 м [3]. Предлагаемая мозаика, в частности, подходит для задач картографирования и инвентаризации водных объектов (рис. 3).

В случае периодической инвентаризации недостатком данных с КА ALOS является отсутствие возможности осуществлять съемку на заказ с заданной периодичностью. Это может быть компенсировано совместным использованием снимков ALOS/PRISM (создание базового покрытия) с данными периодической съемки со спутниковой системы RapidEye (регулярное дежурство береговой линии).

Серьезный интерес представляет также использование данных со спутников сверхвысокого разрешения нового поколения, например, с WorldView-1, WorldView-2, GeoEye-1 и др. Эти данные могут использоваться как для инвентаризации в масштабах 1:5000–1:10 000, так и для определения динамики меандрирования рек и тенденций плановых переформирований русловых мезоформ при проектировании и эксплуатации подводных трубопроводов и других

объектов. В результате сопоставления данных ДЗЗ разных лет выявляются опасные для таких объектов русловые процессы.

#### ▼ Мониторинг состояния водозащитных и гидротехнических сооружений, водоохраных зон и выявление источников загрязнения

Задачи, включенные в данную категорию, объединяет преимущественное использование для их эффективного решения космических снимков сверхвысокого разрешения (не меньше 1 м на местности).

Данные ДЗЗ из космоса позволяют оценивать техническое состояние сооружений, проектировать новые объекты. Особенно перспективно применение таких данных для протяженных объектов как при строительстве, так и при эксплуатации, например, водоохраных дамб, гидротехнических сооружений в труднодоступных районах и т. д.

Немаловажное значение имеет постоянный оперативный мониторинг состояния дамб и плотин с целью своевременного выявления начинающихся процессов их эрозионного размыва, ветрового разрушения, образования каверн в результате развития карстовых, термокарстовых процессов, физического и химического выветривания.

Наконец, по космическим снимкам сверхвысокого разрешения можно наиболее уверенно выявить даже незначительные источники загрязнения в водоохраных зонах и непосредственной близости от них. Данные с КА WorldView-1, WorldView-2, GeoEye-1, QuickBird и IKONOS позволят, например, не только обнаружить молочно-товарную ферму в зоне водосбора (это можно сделать и по снимкам с разрешением в 5–15 м), но и дадут возможность оценить интенсивность ее функционирования, обнаружить места складирования отходов и тальвеги, по которым фекаль-

ные воды устремляются в водоем, причем установить данный факт не вероятно, а в реальности. Это же относится и к другим объектам животноводства, промышленным и канализационным стокам, местам несанкционированного складирования отходов всех видов и другим локальным источникам загрязнения (рис. 4).

В совокупности с информацией о площадных антропогенных воздействиях в рамках водосборного бассейна (распашка, выпас скота, мелиорация, рекреация, вырубка лесов и т. п.), которую можно обнаружить на снимках с более низким разрешением (2,5–15 м), обеспечивается получение объективной интегрированной картины состояния водосбора и водоохраной зоны, а также появляется возможность осуществлять прогнозы и планировать природоохранные мероприятия.

▼ **Мониторинг состояния водной массы, в том числе оценка степени механического, химического, биологического и теплового загрязнения акваторий**

Важным направлением применения данных ДЗЗ из космоса является мониторинг экологического состояния водных объектов. Технология такого мониторинга включает предварительную обработку космических снимков (радиометрическую калибровку, атмосферную коррекцию) и их автоматизированное дешифрирование (спектральные классификации, вычисление индексов, автоматическую векторизацию). Результаты дешифрирования оформляются в виде серий оперативных тематических карт и становятся информационной базой специализированных геоинформационных систем.

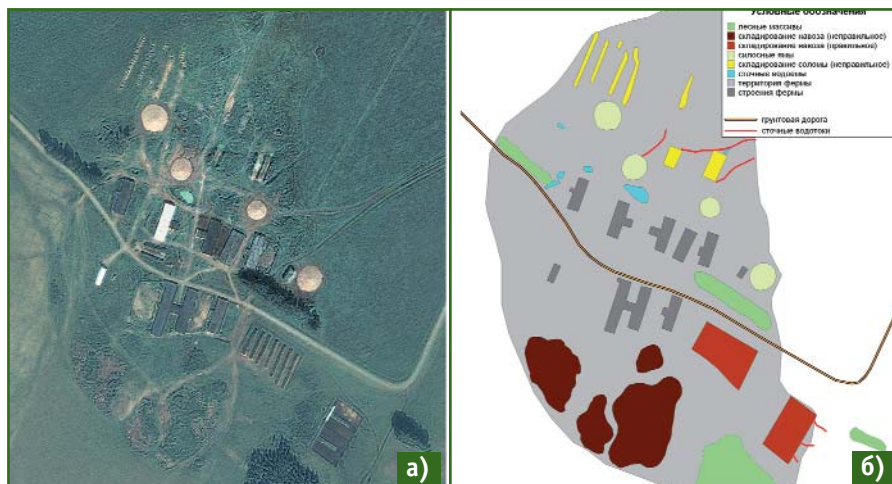
Экологическое состояние водного объекта характеризуется рядом признаков, которые лучше или хуже проявляют себя на космических снимках. Здесь

наиболее перспективны мультиспектральные снимки, по которым хорошо выявляются и количественно измеряются объемы механических взвесей и биогенных элементов. Для большинства водохранилищ актуальна проблема ухудшения свойств воды в результате эвтрофирования — резкого повышения биологической продуктивности зеленых водорослей (чаще всего антропогенно спровоцированного), приводящего к негативным последствиям для всей экосистемы водоема. Выявить наличие этого процесса и его стадии развития можно, изучая изменения спектральных характеристик на серии мультиспектральных снимков. Выборочные полевые исследования, проводимые на акватории, позволяют беспрепятственно перейти к численным показателям объема взвешенных частиц как в случае механического, так и биологического загрязнения.

Довольно часто возникает вопрос: можно ли по космическим снимкам определять химический состав водоема, оценивать содержание того или иного вещества в воде? Напрямую, на основе современной аппаратной и алгоритмической базы данных ДЗЗ — нельзя. Другое дело, когда речь идет о косвенных опре-

делениях, интерполяции. Здесь широкое поле для экспериментов: вышеописанное биологическое загрязнение водоемов обусловлено накоплением в водной массе соединений, так называемых биогенных веществ (соединений фосфора и азота), и само становится фактором резкого снижения содержания кислорода в воде, повышения pH, выпадения в осадок карбоната кальция, гидроокиси магния. Естественно, что содержание этих веществ имеет прямую или обратную пространственную корреляцию с объемом биологической взвеси и на основе выборочного отбора проб на химический анализ может быть оценено и зафиксировано картографическими методами по всей акватории водоема. Это же относится и к соотношениям концентраций механических взвесей, попадающих в водоем из промышленного стока с содержанием техногенных химических веществ, например, микроэлементов. Зная концентрацию взвеси и типичное содержание в ней того или иного элемента (определенную путем отбора проб), можно построить карту распределения конкретного элемента в приповерхностном слое воды.

В отличие от определения уровня химического загрязне-



**Рис. 4**  
 а) Молочно-товарная ферма в бассейне р. Белая (Республика Башкортостан) на снимке с КА IKONOS (разрешение 1 м)  
 б) Источники загрязнения, выявленные по снимку

ния, задача теплового мониторинга водоемов теоретически представляется предельно простой. Фиксация излученной радиации в дальней инфракрасной зоне спектра (8–13 мкм) позволяет свободно переходить к числовым значениям температуры (для большинства функционирующих на орбите съемочных систем погрешность определения температуры не превышает 1–1,5°C). Столь радужная картина быстро рассеивается при переходе от теории к практике: оказывается, на околоземной орбите функционируют лишь четыре спутника, оснащенных радиометрами, позволяющими определять температуру. Из них только три — ASTER (КА Terra), TM и TM+ (КА Landsat-5 и Landsat-7) — обладают довольно высоким пространственным разрешением (90, 120 и 60 м, соответственно). К сожалению, стратегия съемки Земли данными космическими аппаратами не позволяет считать их мониторинговыми в прямом смысле этого слова. Они не осуществляют съемку конкретных участков по требованию заказчика, а работают по системе, заданной оператором. Таким образом, нельзя гарантировать получение снимков на конкретную дату, а опыт использования снимков с этих КА показывает, что в течение года можно обеспечить лишь 3–8-кратную периодичность съемки любого интересующего объекта внутренних вод суши (с учетом облачности), что обычно для мониторинга бывает недостаточно. Четвертый КА — с радиометром MODIS — в противоположность трем вышеперечисленным, позволяет осуществлять практически ежедневно (кроме облачных дней) тепловой мониторинг, за счет большой ширины захвата и низкого пространственного разрешения съемки (1 км на местности в тепловом диапазоне). Но низкое разрешение становится главным ограничением

при использовании этих снимков для мониторинга водных объектов, позволяя осуществлять наблюдение только за крупными водоемами и выявлять наиболее существенные по масштабам изменения.

#### ▼ Оперативный мониторинг результатов наводнений и моделирование процессов затопления территории во время наводнений

Эта область является одним из важных направлений применения данных ДЗЗ, заслуживающих отдельного изложения. Здесь же коротко отметим, что, безусловно, мониторинг паводков можно осуществлять с применением оптико-электронных систем, которые были описаны выше. Однако богатый опыт, накопленный в данной сфере, показывает, что в районах наводнений практически всегда присутствует плотная облачность. Поэтому для решения этих задач предпочтительнее использовать данные с космических аппаратов, оснащенных радиолокационной аппаратурой, для которой, как известно, облачность не является помехой. КА TerraSAR-X (пространственное разрешение 1 м), RADARSAT-2 (3 м), COSMO-SkyMed-1-3 (1 м) как нельзя лучше подходят для этих целей [4]. Они оборудованы современными радарными с синтезированной апертурой, позволяющими выполнять съемку земной поверхности с беспрецедентным для этих систем пространственным разрешением [5]. Таким образом, радиолокационные данные позволяют полностью решить задачи мониторинга паводков, а частично и их прогноза.

Вышеизложенные примеры, безусловно, не исчерпывают богатые возможности использования технологий ДЗЗ в сфере решения разнообразных хозяйственных задач. Они еще раз подчеркивают несомненную перспективность использова-

ния данных ДЗЗ в этой важной сфере.

#### ▼ Список литературы

1. Дворкин Б.А. Новая перспективная группировка спутников RapidEye // Геопрофи. — 2009. — № 3. — С. 14–18.
2. Болсуновский М.А., Беленов А.В. Возможности картографической стереокамеры PRISM спутника ДЗЗ ALOS // Геопрофи. — 2006. — № 6. — С. 28–31.
3. Абросимов А.В., Беленов А.В., Дворкин Б.А. ОРТОРЕГИОН и ОРТРЕГИОН + МОНИТОРИНГ — продукция для картографирования и мониторинга земной поверхности // Геопрофи. — 2009. — № 4. — С. 9–15.
4. Никольский Д.Б. Современные тенденции в радиолокационном дистанционном зондировании Земли // Геопрофи. — 2008. — № 4. — С. 19–24.
5. Всемирная орбитальная группировка космических аппаратов ДЗЗ // Геомастика. — 2008. — № 1. — С. 60–62.



Тел: (495) 988-75-11,  
988-75-22, 514-83-39  
Факс: (495) 988-75-33  
E-mail: info@sovzond.ru  
Интернет: www.sovzond.ru

#### RESUME

There marked the main features the Earth remote sensing system should fit as a whole and for water bodies monitoring in particular. Types of the space systems meeting these requirements are listed. There are described examples of using various Earth remote sensing data for the inventory of water bodies' boundaries, state monitoring for water objects, water retaining and hydrotechnical structures, revealing pollution sources, assessing the degree of the water pollution as well as the flooding timely monitoring and simulation.