

УДК 528.8

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БАТИМЕТРИИ ВОДОЁМОВ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ СРЕДСТВАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2013 Г. П. Аншаков, В. А. Малиновский,  
Е. А. Синельникова, В. К. Скирмунт

ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”», г. Самара

Рассматриваются методы решения задач батиметрии малых рек и водоёмов с помощью данных дистанционного зондирования Земли. Приводятся результаты проведённых экспериментальных работ.

*Дистанционное зондирование Земли, батиметрия, моделирование мультиспектральных изображений.*

### Введение

Батиметрия – изучение рельефа подводной части водных бассейнов: как мирового океана, так и озёр, рек и т.д. [1]. Одна из важнейших задач батиметрии – получение карты глубин водоёма. Особенно важна мелководная батиметрия, необходимая для исследований морфологии дна, мониторинга экологического состояния водных ресурсов, а главное – для разработки 3D-моделей, позволяющих прогнозировать катастрофические последствия наводнений и принимать меры к их предотвращению. Наличие таких оперативно обновляемых данных позволяет избежать чрезвычайных ситуаций, подобных произошедшей в 2012 году в г. Крымск Краснодарского края.

Применительно к решению задач батиметрии наиболее известен метод, основанный на использовании гидролокации. Современные подводные многолучевые гидролокаторы обеспечивают получение большого объёма высокоточных данных, на основании которых решаются основные задачи батиметрии. Однако высокая стоимость работ, связанных с использованием этого метода, не позволяет применять его при решении задач батиметрии малых рек и водоёмов, особенно на региональном уровне.

Как альтернатива гидролокации начиная с 80-х годов XX века постепенно

внедряется технология дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Удобное представление, лёгкий доступ и динамический характер использования данных ДЗЗ дают возможность реализовать экономически выгодный способ решения задач батиметрии применительно к морскому побережью.

Целью проводимых исследований является оценка возможности решения более сложной задачи – батиметрии малых рек и водоёмов. Сложность задачи определяется проблемой распространения света в условиях сильной замутнённости речных вод.

### Условия распространения света в воде

Условия распространения света в воде и в воздухе существенно различаются. Часть светового потока отражается водной поверхностью, часть рассеивается растворёнными в ней веществами и взвешенными частицами, а часть, поглощаясь, превращается в тепловую энергию, нагревая воду (рис. 1). Дальность видимости в воде зависит от освещённости, которая, в свою очередь, зависит от толщины слоя воды, степени отражения света поверхностью воды и степени рассеивания света в водной среде [2].

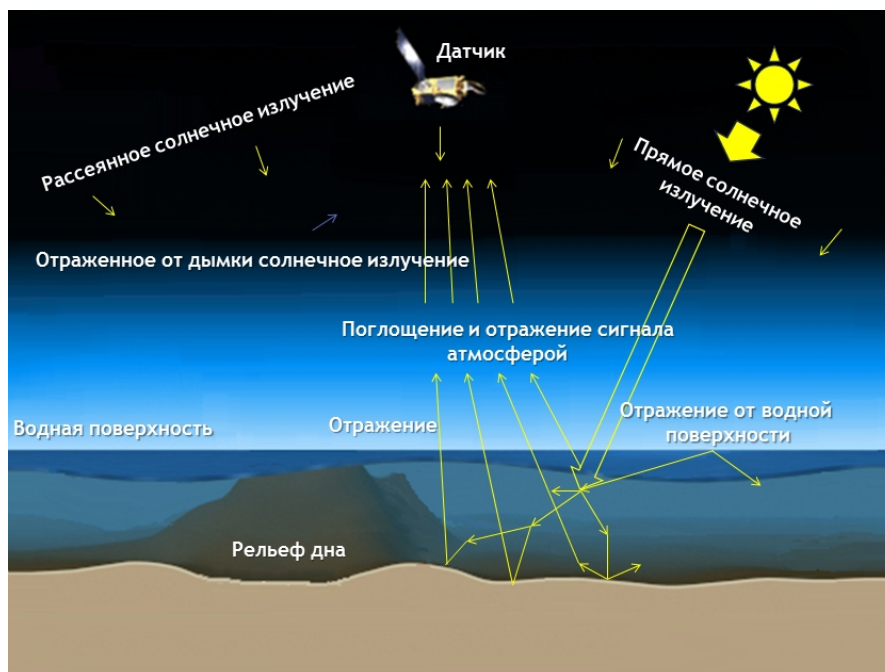


Рис. 1. Схема распространения света в водной среде

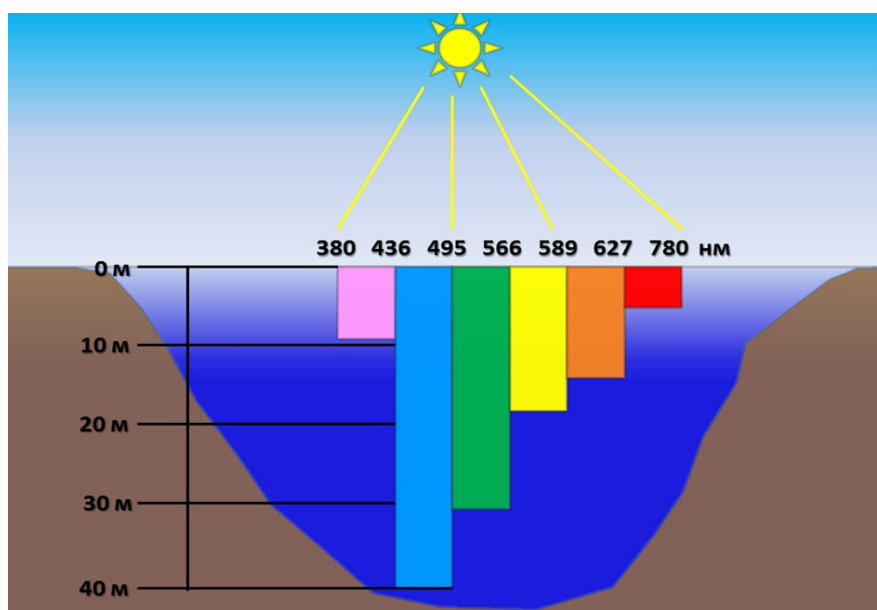


Рис. 2. Глубина проникновения солнечных лучей

Для прозрачных вод, когда практически отсутствуют взвеси и фитопланктон, красные лучи проникают на глубину до 10 м, жёлтые – до 20 м, и только синеголубые лучи достигают глубины 40 м (рис. 2). Поэтому космические снимки обеспечивают изучение рельефа дна лишь в зоне мелководного шельфа.

### Основы метода

Метод батиметрии основан на спектральной зависимости глубины проникновения света в водной среде. Поэтому набор изображений, полученных в разных спектральных диапазонах, обеспечивает разноглубинные срезы дна и водной толщи, что позволяет использовать результа-

ты мультиспектральной съёмки для батиметрии рек и водоёмов. Применяемый в работе алгоритм оценки глубины водоёма основан на упрощённой модели коэффициента отражения водной поверхности, которая учитывает основную часть сигнала, но пренебрегает эффектами рассеивания и внутренним отражением водной поверхности [3, 4, 5, 6, 7].

Рассматривается два приложения данного алгоритма к отображению процесса оценки глубины – поведение алгоритма в описании относительных и абсолютных глубин, включая эмпирические данные о замерах глубин.

В соответствии с принятой в алгоритме моделью свет затухает экспоненциально с увеличением глубины водного столба и выражается по закону Бера:

$$L(z) = L(0) \cdot \exp(-Kz), \quad (1)$$

где  $L$  – интенсивность света на глубине  $z$ ,  $L(0)$  – интенсивность света на поверхности воды,  $K$  – коэффициент поглощения и  $z$  – глубина.

Так как анализ глубины проникновения света должен учитывать экспоненциальное уменьшение лучистости с глубиной, то зависимость наблюдаемого коэффициента отражения  $R_w$  от глубины водоёма может быть записана в виде:

$$R_w = (A_d - R_\infty) \exp(-gz) + R_\infty, \quad (2)$$

где  $R_\infty$  – коэффициент отражения водного столба,  $A_d$  – альbedo дна,  $z$  – глубина,  $g$  – значения коэффициентов поглощения для нисходящего и восходящего светового потока [3].

Уравнение (2) может быть перегруппировано для описания глубины водоёма в зависимости от коэффициентов отражения и альbedo дна:

$$z = g^{-1} [\ln(A_d - R_\infty) - \ln(R_w - R_\infty)]. \quad (3)$$

При наличии хотя бы двух спектральных каналов значение альbedo для

вычисления глубины могут быть скорректированы:

$$Z = a_0 + a_i X_i + a_j X_j \quad (4)$$

и может быть получено линейное решение:

$$X_i = \ln[R_w(\lambda_i) - R_\infty(\lambda_i)]. \quad (5)$$

Константы  $a_0$ ,  $a_i$ , и  $a_j$  обычно определяются посредством множественной линейной регрессии.

Для любого метода определения глубины с помощью пассивных систем ДЗЗ наличие различных вариаций прозрачности водной среды и её спектрального поглощения вызывают дополнительные сложности [8]. В уравнениях (4) и (5), представленных выше, есть пять переменных, которые должны быть определены эмпирически:  $R_w(\lambda_i)$ ,  $R_\infty(\lambda_j)$ ,  $a_0$ ,  $a_i$  и  $a_j$ . К проблемам реализации данного метода следует отнести тот факт, что в случае отрицательной разности ( $R_w - R_\infty$ ) параметр  $X$  не может быть определён.

Существует альтернативное решение, которое требует меньшего количества параметров и устойчиво к изменениям типов дна водоёмов.

В основе этого метода лежит тот факт, что все диапазоны электромагнитного спектра излучения имеют различную степень поглощения в водной среде. Соответственно, в каждом спектральном канале от одного элемента поверхности дна будет фиксироваться различный уровень сигнала. Естественно, что при изменении глубины изменится и это соотношение. Поскольку с увеличением глубины коэффициент отражения обоих каналов уменьшается, то значение натурального логарифма коэффициента поглощения  $\ln(R_w)$  спектрального канала с более высоким поглощением (зелёный канал) уменьшается быстрее значения натурального логарифма коэффициента поглощения  $\ln(R_w)$  спектрального канала с более низким (синий канал) поглощением. Соответственно, соотношение синего канала

и зелёного изменится в пользу первого. Изменение альbedo дна действует на обе полосы одинаково, однако изменения в глубинах сильнее влияют на спектральный канал с более высоким поглощением. Таким образом, значение отношения сигналов в соответствующих спектральных каналах определяет глубину водоёма независимо от альbedo дна и нуждается только в приведении к фактической глубине, а именно:

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} - m_0, \quad (6)$$

где  $Z$  – фактическая глубина (в метрах),  $m_1$  – настраиваемая константа, определяющая коэффициент масштабирования глубины,  $n$  – зафиксированная константа для всех областей,  $m_0$  – смещение для

глубины 0 м ( $Z = 0$ ), аналогично  $a_0$  из формулы (4).

Постоянное значение  $n$  в формуле (6) необходимо для гарантии того, что логарифм будет положителен при любом условии и отношение рассчитает линейную зависимость глубин.

### Проведение экспериментальных исследований

Для апробации технологии построения батиметрической модели рельефа дна было выбрано несколько характерных водных объектов, расположенных на территории Самарской области: Чубовское водохранилище, Кутулукское водохранилище, Черновское водохранилище, река Самара, река Кинель (рис. 3).

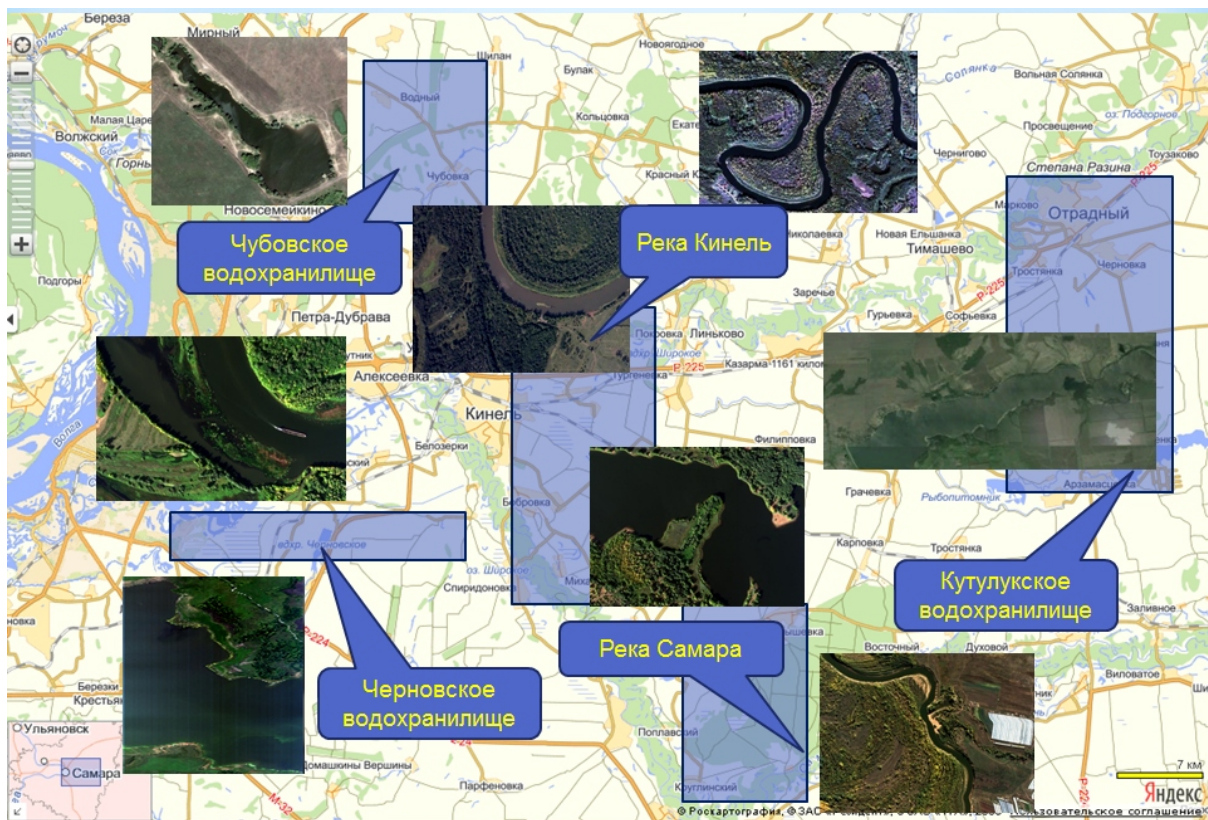


Рис. 3. Объекты исследования

Одной из основных задач исследования была оценка возможности использования данных КА «Ресурс-П» для по-

строения батиметрических карт. На рис. 4 представлены спектральные диапазоны действующих космических систем, кото-

рые используются для решения задач батиметрии. Очевидно, что целевая аппаратура КА «Ресурс-П» также обладает необходимым набором спектральных каналов.

Необходимые данные по выбранной территории были получены осенью 2012 и летом 2013 г. с использованием самолётного образца экспериментальной гиперспектральной аппаратуры. Далее за счёт объединения спектральных каналов и бинирования пикселей по пространству были смоделированы спектральные каналы КА «Ресурс-П».

При обработке полученных спектральных данных использовались два алгоритма батиметрии, реализованные в

ПК ENVI – расчёт относительной глубины и расчёт абсолютной глубины (Relative Water Depth). Оба алгоритма основаны на отношении яркостей в диапазонах видимого спектра излучения, как было описано выше. Традиционно для определения глубин в алгоритме используется 4 спектральных диапазона: синий (blue), зелёный (green), красный (red), ближний ИК (NIR). Поэтому при обработке изображений были смоделированы мультиспектральные изображения с пространственным разрешением 3 м, содержащие набор каналов, соответствующих спектральным каналам КА «Ресурс-П» (рис. 5).

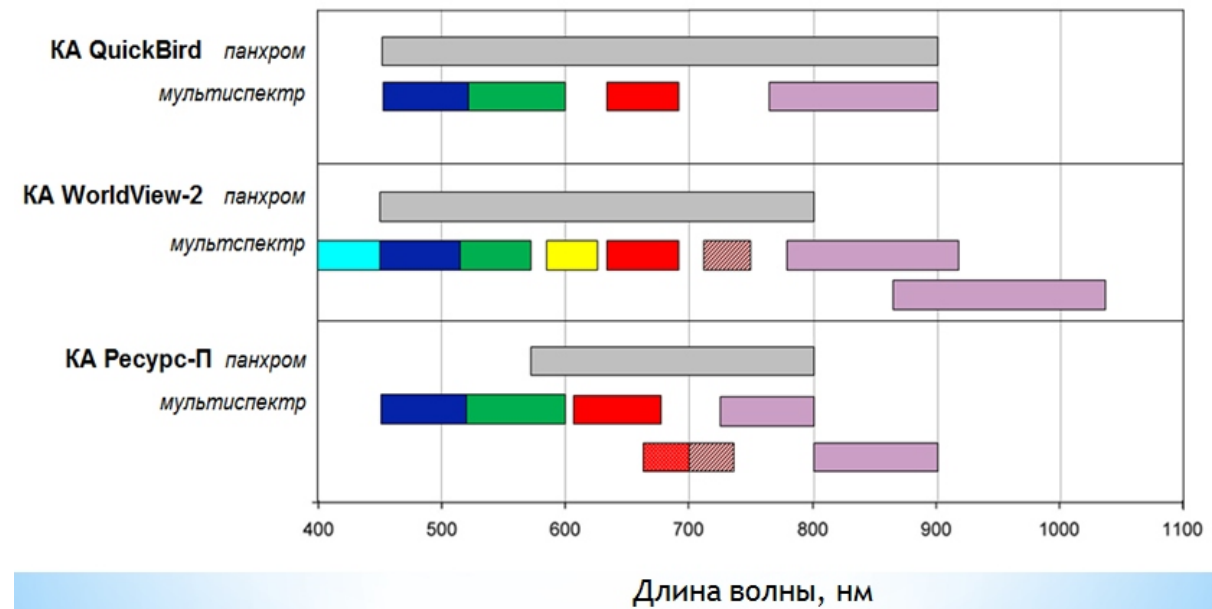


Рис. 4. Спектральные диапазоны КА QuickBird, WorldView-2, «Ресурс-П»

На первом этапе исследования был опробован алгоритм определения относительной глубины водоёма. В процессе обработки при расчёте относительной глубины был исключён этап атмосферной коррекции, так как при этом меняются спектральные характеристики водной поверхности, что может привести к неудовлетворительным результатам отображе-

ния глубин. Для сглаживания шумов на изображении проведена коррекция медианным фильтром.

На рис. 6 представлены карты относительных глубин (шкала глубин принимает значения от 0 до 1), построенные по Чубовскому и Кутулукскому водохранилищам и участку реки Кинель.



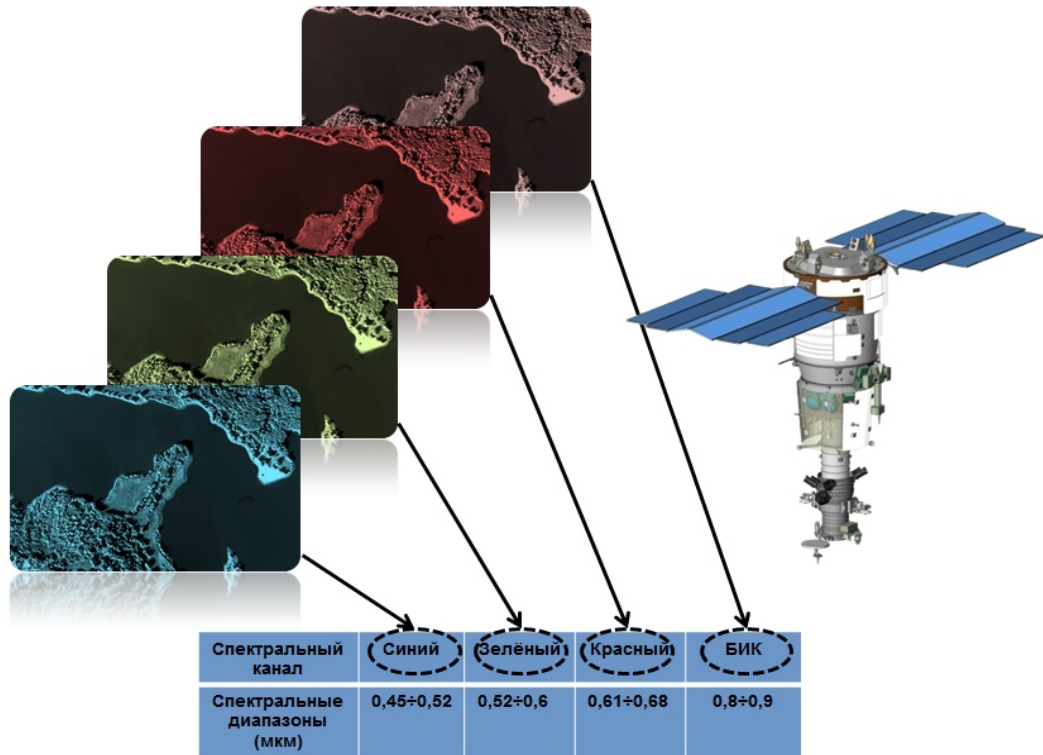


Рис.5. Моделирование спектральных каналов КА «Ресурс-П»

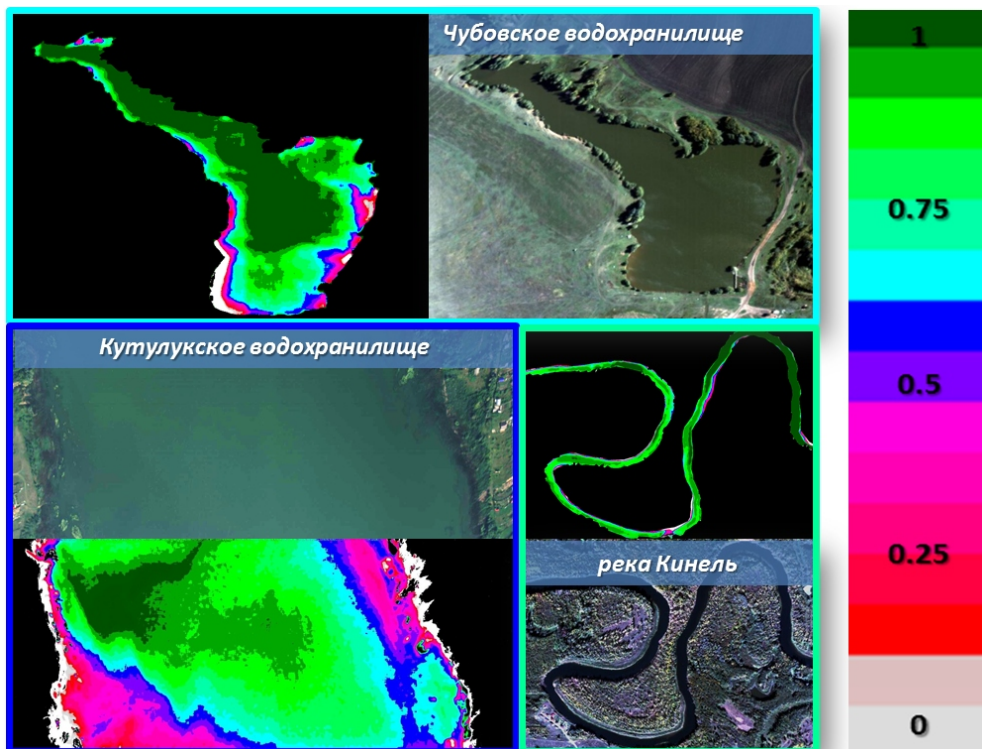


Рис.6. Карты относительных глубин

Для оценки точности модели, построенной с использованием данных ДЗЗ, были организованы полевые работы по замеру глубин Чубовского водохранилища, которые проводились 5 сентября 2012 г. исследовательской группой «ЦСКБ-Прогресс» с использованием эхолотатора Humminbird 450tx.

На основе данных, полученных с помощью эхолотатора, были построены трёхмерная модель и карты глубин (рис. 7). На рис. 7 также представлен кос-

моснимок водохранилища с обозначенными на нём траекториями измерения глубин с помощью эхолота.

Преобразование относительных глубин в абсолютные значения осуществлялось с использованием опорных точек (минимальное количество точек для определения глубины в данном методе равно трём). На рис. 8 приведены результаты калибровки абсолютной глубины для Чубовского водохранилища.

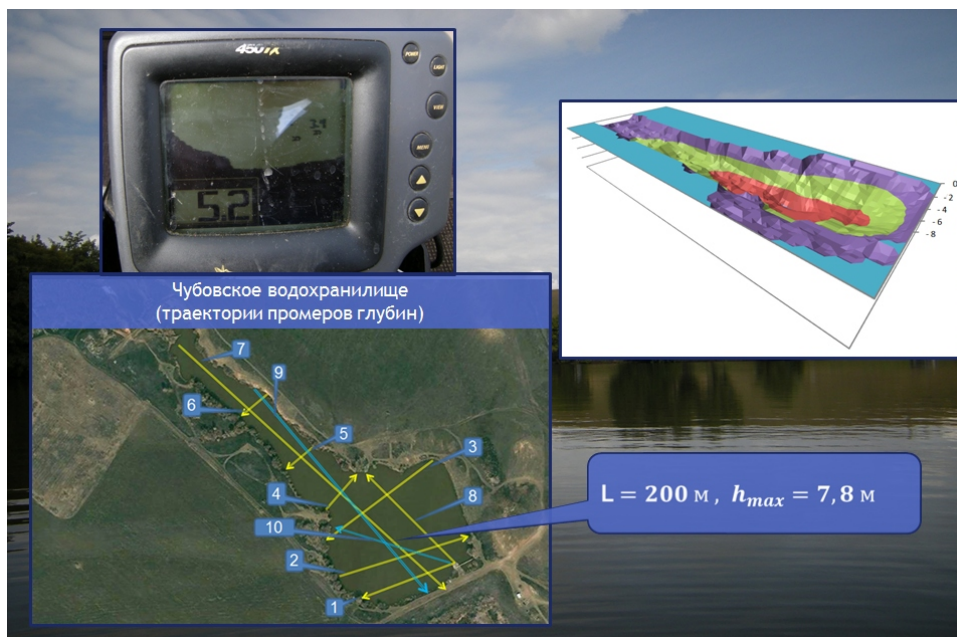


Рис. 7. Результаты обработки данных, полученных методом гидролокации

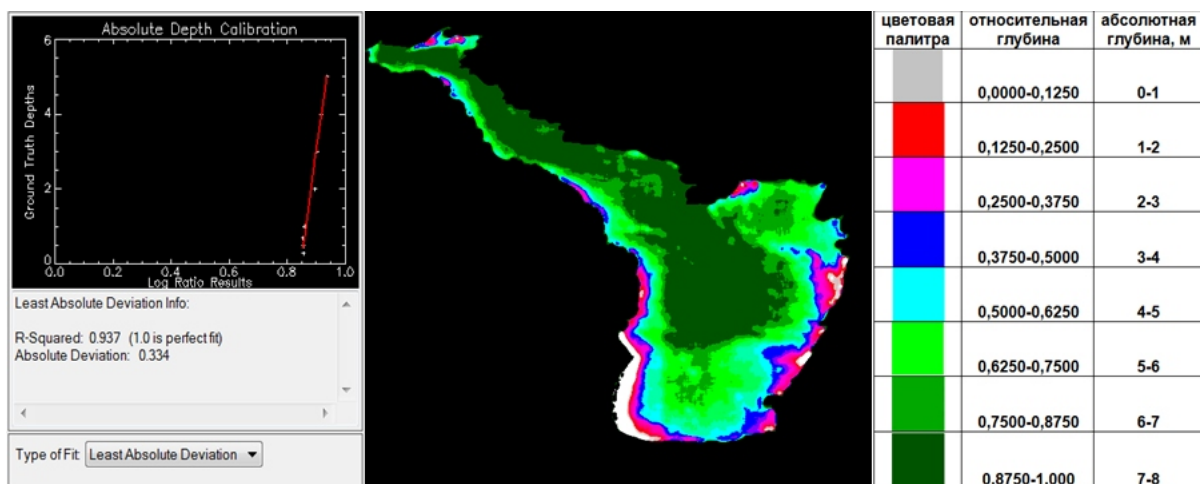


Рис.8. Карта абсолютных глубин Чубовского водохранилища



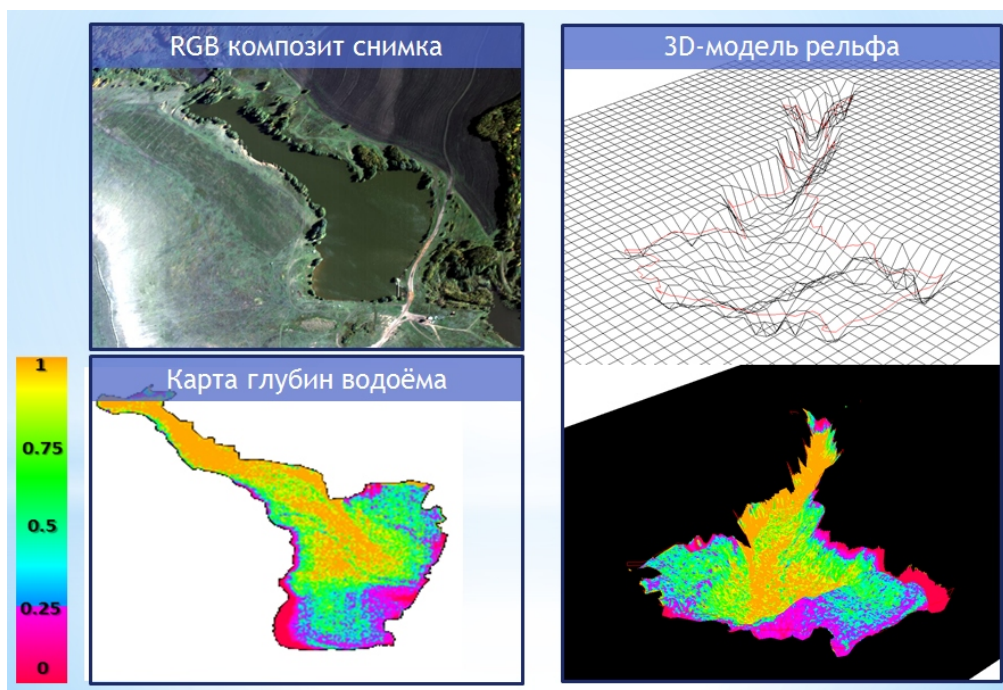


Рис. 9. Визуализация рельефа дна Чубовского водохранилища

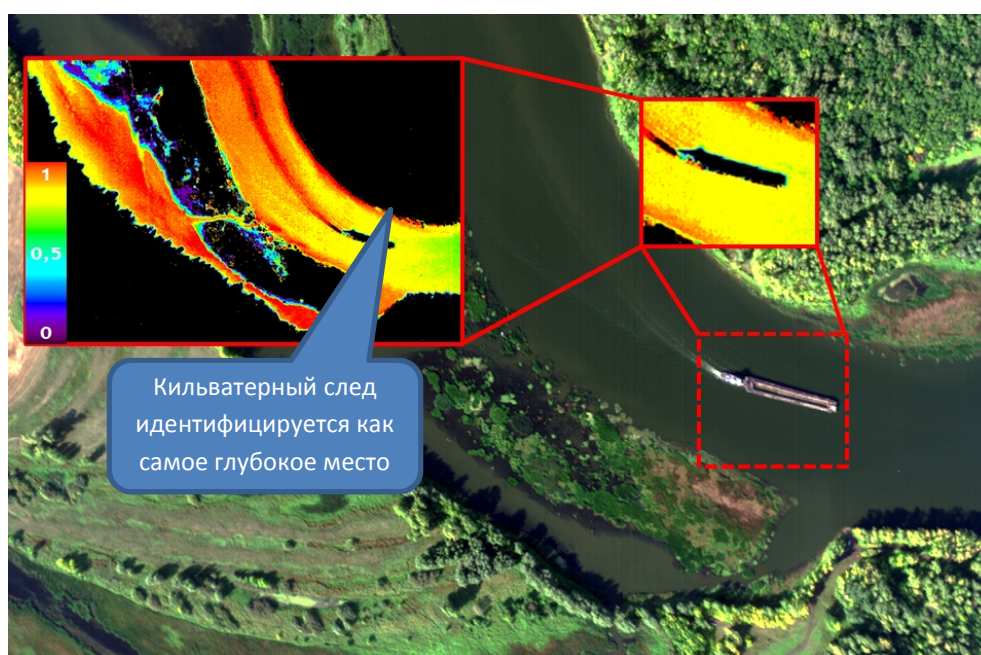


Рис. 10. Карта глубин на участке реки Самары

На рис. 9 представлены пространственные трёхмерные изображения рельефа дна в исследуемых областях, полученные с использованием созданной модели батиметрии.

При реализации задач батиметрии методами дистанционного зондирования Земли существенным помеховым факто-

ром является наличие различных объектов на водной поверхности, например, нефтяное пятно или кильватерный след от движения судна (рис. 10).

Полученные по спектральным характеристикам водных объектов карты глубин проанализированы стандартными статистическими методами для оценки



определения точности. При этом максимальная абсолютная погрешность определения глубины водоёма равна 0,5 м. Относительная ошибка при этом находится на уровне 6,7 %.

### Заключение

Проведённые исследования позволили оценить возможность создания высокоинформативных продуктов батиметрических карт малых рек и водоёмов Самарской области на базе экспериментальных данных, получаемых с КА Ресурс-П. Несмотря на высокую сложность создания данного тематического продукта (связанную с высокой степенью замутнённости водной среды), реализованные методы позволяют резко повысить оперативность получения данных и сократить применение дорогостоящих технических средств (гидролокация).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ «ОФИ\_М» №13-01-12014.

### Библиографический список

1. <http://dic.academie.ru/dic.nsrwki/618658>.

2. Печатин, А.А. Человек под водой [Текст] / А.А. Печатин, В.Г. Фадеев, В.Д. Суровикин. – М.: ДОСААФ, 1967.

3. Lyzenga, D.R. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data / D.R. Lyzenga // International Journal of Remote Sensing. – 1981. – V. 2(1). – P. 71-82.

4. Lyzenga, D.R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features / D.R. Lyzenga // Applied Optics. – 1978. – V. 17 (3). – P. 379-383.

5. Lyzenga, D.R., Shallow-water reflectance modeling with applications to remote sensing of ocean floor / D.R. Lyzenga // Proceeding of 13th International Symposium on Remote Sensing of Environment. – 1979. – P. 583-602.

6. Polcyn, F.C. Water depth determination using remote sensing techniques / F.C. Polcyn, I.J. Sattinger // Proceedings of the 6th International Symposium on Remote Sensing of Environment. – 1969. – P. 1017-1028.

7. Stumpf, R.P. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types / R.P. Stumpf, K. Holderied // Limnology and Oceanography. – 2003. – V. 48(1). – P. 547-556.

8. Philpot, W.D. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery / W.D. Philpot // Applied Optics. – 1989. – V. 28(8). – P. 1569-1579.

## MODELLING OF SOLVING PROBLEMS OF SAMARA REGION 'S WATER BODIES BATHYMETRY BY MEANS OF EARTH REMOTE SENSING

2013 G.P. Anshakov, V.A. Malinovskii, E.A. Sinelnikova, V.K. Skirmunt

Space Rocket Center "TsSKB-Progress", Samara

Methods of solving the problems of depth sounding of small rivers and ponds by means of Earth remote sensing are discussed in the paper. The results of the experimental work carried out are presented.

*Earth remote sensing, bathymetry, modelling of multispectral images.*

### Информация об авторах

**Аншаков Геннадий Петрович**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор, заместитель генерального конструктора, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»», г. Самара. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки информации дистанционного зондирования Земли.

**Малиновский Владимир Андреевич**, заместитель начальника отдела, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»», г. Самара. E-mail: [vladmalinovski@gmail.com](mailto:vladmalinovski@gmail.com). Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки информации дистанционного зондирования Земли, методы измерения координат объектов, радиолокационные системы с синтезированной апертурой.

**Синельникова Елена Анатольевна**, инженер-конструктор, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»», г. Самара. E-mail: [astra2311@yandex.ru](mailto:astra2311@yandex.ru). Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки информации дистанционного зондирования Земли.

**Скирмунт Валерий Константинович**, начальник центра информационных технологий ДЗЗ, ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»», г. Самара. E-mail: [mail@samspace.ru](mailto:mail@samspace.ru). Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, методы обработки информации дистанционного зондирования Земли.

**Anshakov Gennady Petrovich**, Doctor of engineering, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Professor, Deputy General Designer of Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of Research: Earth Remote Sensing, Methods of Processing Remote Sensing Information.

**Malinovskii Vladimir Andreevich**, Assistant Head of Department, Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: [vladmalinovski@gmail.com](mailto:vladmalinovski@gmail.com). Area of Research: Earth Remote Sensing, Methods of Processing Remote Sensing Information, Measurement of Position Data, Synthetic Aperture Radars.

**Sinelnikova Elena Anatolievna**, Design Engineer, Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: [astra2311@yandex.ru](mailto:astra2311@yandex.ru). Area of Research: Earth Remote Sensing, Methods of Processing Remote Sensing Information.

**Skirmunt Valeriy Konstantinovich**, IT-center Chief, Space Rocket Center “TsSKB-Progress”. E-mail: [csdb@samspace.ru](mailto:csdb@samspace.ru). Area of Research: Earth Remote Sensing, Methods of Processing Remote Sensing Information.