



УДК 621.377.2

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕКОНВОЛЮЦИИ КОСМИЧЕСКОГО  
ИЗОБРАЖЕНИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ СТЕПЕНИ  
РЕГУЛЯРИЗАЦИИ В СИНТЕЗЕ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАКТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**  
**AN ANALYSIS OF INFLUENCE ON THE RESULTS OF DECONVOLUTION  
OF SPACE IMAGE OF HIGH-RES OF WEAKENING TO THE DEGREE  
OF REGURALIZATION IS IN THE SYNTHESIS OF FREQUENCY-CONTRASTING  
DESCRIPTION OF HIGHWAY OF THE REMOTE SENSING**

**В.Н. Винтаев**  
**V.N. Vintayev**

*Белгородский университет кооперации, экономики и права, Россия, 308023, Белгород, ул. Садовая, 116а*  
*Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116a Sadovaya St, Belgorod, 308023, Russia*

*e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru*

*Аннотация.* Для выполнения тонкой коррекции резкости космического изображения высокого разрешения реализуется вычисление пространственно-частотных спектров функций рассеяния точки по опорным ориентирам, синтез частотно-контрастной характеристики тракта и фильтрация изображения со специальным образом синтезированным ядром итеративного оператора деконволюции. В работе приведен анализ влияния на результаты деконволюции ослабления степени регуляризации сингулярностей, присутствующих в перечисленных выше объектах и предлагается замена приводящей к квазирешениям по деконволюции регуляризации на метод работы с сингулярными на мере нуль обобщенными функциями, представляющими соответствующие сингулярности.

*Resume.* For fine correction of sharpness space high resolution images is implemented by calculating a spatial-frequency spectra of functions of the scattering point on the reference benchmarks, a synthesis of the frequency-contrast characteristics of the tract and filtering of the image with the special image synthesized by the core iterative deconvolution operator. The paper presents the impact analysis results from deconvolution of weakening the degree of regularization of singularities, present in the above-mentioned objects and suggests replacement leading to quasi-solutions in the regularization of the deconvolution method to work with singular in zero as generalized functions representing the corresponding singularity.

*Ключевые слова:* пространственно-частотный спектр, функция рассеяния точки, деконволюция, интеграл Лебега, формула Ван Циттера, сингулярная обобщенная функция с носителем меры нуль

*Keywords:* spatially-frequency spectrum, function of dispersion of point, deconvolution, the Lebesgue integral, formula of Van Zitter, singular generalized function with the carrier of measure zero

## **Введение**

Строя деконволюцию – решение интегральных уравнений Фредгольма с использованием спектральных представлений оператора деконволюции (СПОД) и минимизируя невязки обратной оптимизированной частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) тракта зондирования  $1/(ЧКХ)$  и СПОД на этапах итеративного процесса коррекции, можно свести «остаточную» функцию рассеяния точки (ФРТ) [1] к апертуре пиксела [2-5]. ЧКХ на этапах итераций синтезируется классическим отношением пространственно частотных спектров (ПЧС) исходного и корректируемого изображений в специальном разработанном аддитивном представлении задачи коррекции изображения на основе обобщенного градиентного оператора с варьируемым порядком [2-5].

Оптимизация ЧКХ проводится минимизацией функционалов, сформулированных на требованиях, наиболее весомые из которых это:

– отсутствие тенденции спада и роста аппликат ЧКХ вплоть до приближения к высшим спектральным модам в заданных пределах;

– не превышения значением порядка градиентного оператора порога, при котором резидентно присутствуют глобальное контрастирование или выделение контуров и т.д. [3].

Одной из проблем при этом является необходимость регуляризации возникающих сингулярных значений в синтезируемой и оптимизируемой ЧКХ. Однако, регуляризация приводит в итоге к квазирешениям по резкости, то есть к улучшению резкости на изображениях, близких по некоторой норме к корректируемым изображениям [6]. Дальнейшие шаги по выравниванию ситуации, как правило, связывают с аналитическим исследованием распознаваемых опорных ориентиров (ОО) на сформированном изображении и их эталонов (Э), причем ориентиры эти не всегда могут быть даже аттестованы метрологически и не смогут дать возможности «выдавить» нежелательные артефакты от регуляризаций за пределы штатной и откорректированной в высшую сторону полосы пропускания пространственных частот трактом зондирования.



В настоящей статье предложен метод представления упомянутых сингулярностей обобщенными сингулярными функциями медленного роста Шварца (с носителем меры нуль) [7,8], свертка с которыми при их подстановке в формулу коррекции резкости, т.е. уже реализованную формулу Ван Цитгера, дает окончательное решение по деконволюции. При этом интегралы Римана преобразуются в интегралы Лебега при аналитическом интегрировании (с предварительной передискретизацией участка интегрирования и функционализацией интегрируемого массива), а при численном интегрировании, в силу представления сингулярности предельно возможным узким прямоугольником в верхней и нижней сумме Дарбу для интеграла всегда присутствует условие нормировки на конечную величину, без которого описанная только что модель функции Шварца не имеет смысла.

Цель работы: на основе анализа влияния ослабления степени регуляризации сингулярных артефактов при коррекции резкости космического изображения построить охарактеризовывающие примеры уклонений квазирешений от решений задачи по деконволюции с заменой сингулярных артефактов обобщенными сингулярными функциями медленного роста.

### **Коррекция резкости изображения и анализ влияния ослабления степени регуляризации сингулярностей на результаты деконволюции**

Ослабление степени регуляризации целесообразно оценивать снижением значения нормы отклонения регуляризованного параметра от значения, вызвавшего наличие соответствующей сингулярности.

Возникают сингулярные значения достаточно часто, так как используемый в знаменателе выражения для синтеза ЧКХ пространственно-частотный спектр (ПЧС) первично откорректированного изображения имеет достаточное количество нулей. Применяемые в практике аналогичных операций со спектрами методы регуляризации («замазывание» нулей стремящимися к нулю параметрами (регуляризация Тихонова) или игнорирование соответствующих пространственных частот в решаемой задаче с уменьшением в пределе полос «игнорирования») приводят всегда к близкому к «истине» решению, которое не только неоднозначно, но и не всегда попадает в интервал отклонений от «истины», лежащий в области пространственных частот за пределами соответствующих возможностей окна пропускания трактом зондирования [6]. Это приводит к так называемому квазирешению по коррекции разрешения, т.е. коррекции разрешения на «не совсем том», т.е. не совпадающим с исходным изображением [6]. Отсюда следует паллиативная постановка проверки упоминаемой «истинности» деконволюции: методом приведения откорректированных изображений к исходному редуцией их ПЧС покомпонентным перемножением с реализованной при первичной аддитивной [5] коррекции неоптимизированной ЧКХ тракта зондирования.

Отмечаемые сингулярности, в работе представляются объектом - обобщенной сингулярной функцией медленного роста (обобщенной функцией Шварца), определенной на счетном множестве-векторном дискретном пространстве [7-9].

При этом в работе используется модель сингулярности на основе дельта - функции как функции Шварца и строится следующим образом: в подинтегральном выражении, например, в точке сингулярности встраивается прямоугольник (в двумерном варианте параллелепипед) высотой, определяемой десятикратным максимальным диапазоном аппликата в тракте зондирования и шириной (диаметром основания), равной обратному значению высшей пространственной частоты в тракте. Для решаемых в спектральной области задач из всего спектрального диапазона в силу ортонормированности базисов спектральных представлений вырезаются субполосы, содержащие проблему сингулярности, на них одновременно с оставшимися интервалами решается задача деконволюции, а потом производится сборка результата на спектральной плоскости по методу объединения множеств аппликата результирующих изображений, приведенному в [10]:

$$S_H = F^{-1} \left( \bigcup_{i,j} \mu_{i,j} F(S_H)_{ij} \right) \quad (1)$$

где  $S_H$  – полное восстанавливаемое изображение;  $(S_H)_{ij}$  – восстанавливаемое изображение в  $ij$ -той выделенной субполосе,  $F^{-1}, F$  – обратное и прямое двумерное Фурье-преобразование, соответственно,  $\mu_{i,j}$  – весовые коэффициенты (функции принадлежности), а сами множества отсчетов  $F(S_H)_{ij}$  считаются нечеткими с изопланатичными функциями принадлежности равными  $\mu_{i,j}$ .

Функции принадлежности  $\mu_{i,j}$  вычисляются по правилу:

$$\mu_{ij} = \|F(S_H)_{ij}\|^2 / \sum_{i,j} \|F(S_H)_{ij}\|^2 \quad (2)$$

Такой подход необходим, так как при разбиении спектра изображения на субполосы, номера, присвоенные ранее гармоникам не меняются, все абсолютно результаты деконволюции

расширяются по полосе ПЧС в высшую сторону и при описанной композиции множества частот пересекаются.

Далее, для спектральных участков задачи коррекции с сингулярными функциями все соотношения, полученные в работах [2,3,4,5] при оптимизации ЧКХ строятся классически в виде интегралов – скалярных произведений на основные функции [7], т.е. рассматриваются над полем основных функций класса  $C^{(\infty)}$  (подразумевая при этом слабую сходимость при численном интегрировании). Осциллирующая экспонента может быть такой основной функцией, тем более, что норма ее равна единице [7], но в работе использовалась основная функция  $\varphi = \exp(-\omega)$ , где  $\omega$  может ограничиваться верхним значением пространственной частоты  $\omega_c$  в окне пропускания тракта зондирования.

Например, соотношение максимизации объема под огибающей ЧКХ, формализующее требование из набора требований [4] при оптимизации ЧКХ преобразуется за счет организации на нем указанного выше скалярного произведения к виду:

$$\int_0^{\omega_c} (ЧКХ(\omega_i, \omega_j) \delta\omega_i \delta\omega_j) \varphi d\omega = R_1 (1 - \exp(-\omega_c)) = \max \quad (3)$$

где  $M$  и  $N$  – размеры в отсчетах спектрального окна задачи,  $\delta\omega_i$  и  $\delta\omega_j$  – приращения значений мод спектрального представления, равные  $2\pi/N$  и  $2\pi/M$ .

Итоговое соотношение Ван-Циттера для итеративного оператора деконволюции [2,3,4,5] не изменяется за исключением того, что интегрирование при выполнении свертки в нем реализуется по правилам численного интегрирования Лебега.

При этом следует акцентировать, что модель сингулярности в формуле представлялась на основе функции Шварца – дельта-функции Дирака: это встраиваемый в точке сингулярности после выполнения Фурье-преобразований (в смысле слабой сходимости) описанный выше параллелепипед.

Исследования при этом показали, что при увеличении высоты параллелепипеда в модели сингулярности или надо уменьшать его ширину, что невозможно, т.к. нет в наличии пикселей с такими малыми апертурами или соглашаться с возникающими артефактами в виде различных искажений контраста на изображении. Этот вопрос в настоящее время исследуется отдельно, т.к. представляет собой исследование построений конечных моделей объектов меры нуль для коррекции изображений и в данной работе не может быть изложен.

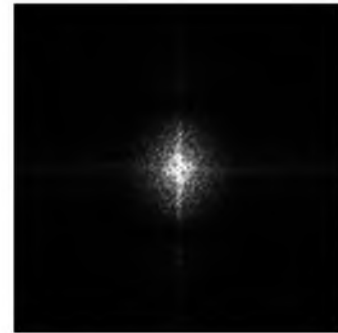
Ниже, на изображении высокого разрешения (точнее сверхвысокого, т.к. полученного по технологии сверхвысокого разрешения) с аппарата OrbView-3 показаны проведенные вычислительные эксперименты по применению разработанной методики (Рис.1–Рис.4).

В данном эксперименте исходный фрагмент рассматривался как откорректированный относительно расфокусированного для вычисления первичной ЧКХ для метода итеративной деконволюции.

Ниже приведены результаты сравнения полученных экспериментальных изображений с исходным изображением, указанным выше методом обратных преобразований вычислением в метрике Хемминга соответствующей невязки (Рис.5 – Рис.7).

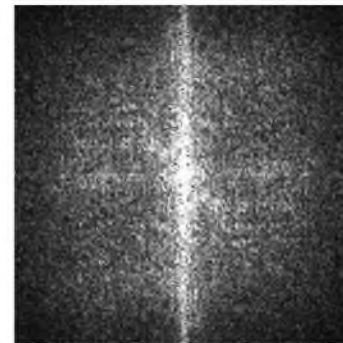
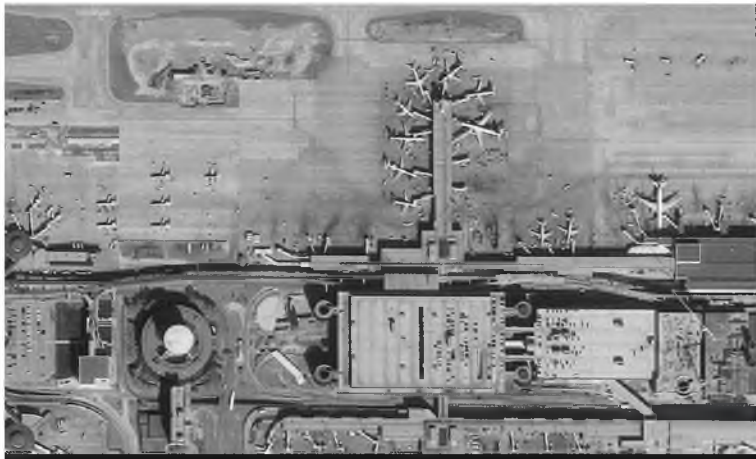


Рис. 1. Исходный фрагмент сформированного изображения высокого разрешения и его ПЧС  
Fig. 1. The initial fragment of the generated high-resolution images and PSP



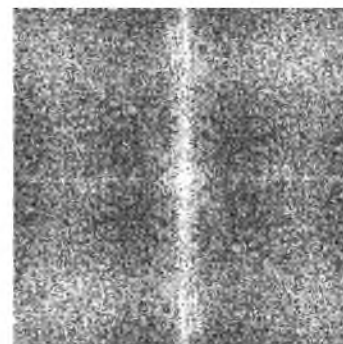
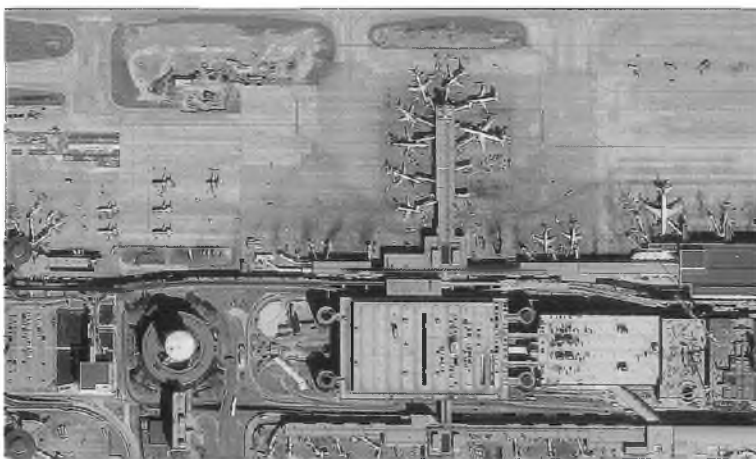
*Рис. 2.* Исходный фрагмент сформированного изображения высокого разрешения с расфокусировкой и его ПЧС

*Fig. 2.* The original fragment of the formed image with high resolution focus and his PSP



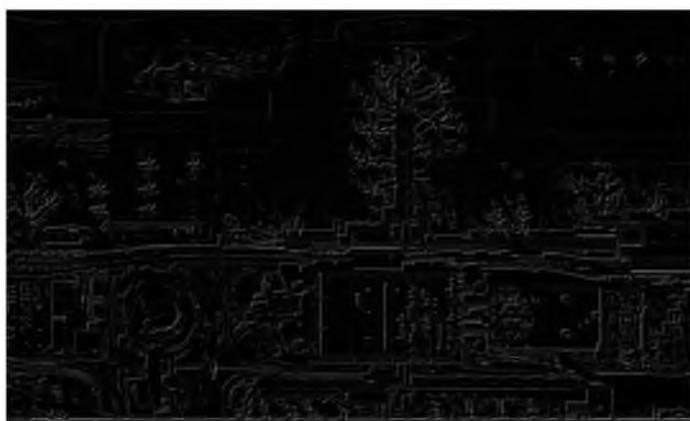
*Рис. 3.* Результат выполненной деконволюции по предлагаемой технологии

*Fig. 3.* The result of deconvolution by the proposed technology



*Рис. 4.* Результат, показывающий начальное состояние разрушения изображения при дополнительных шагах итеративной деконволюции

*Fig. 4.* Result indicating the initial state of the destruction of the image with the additional steps of iterative deconvolution

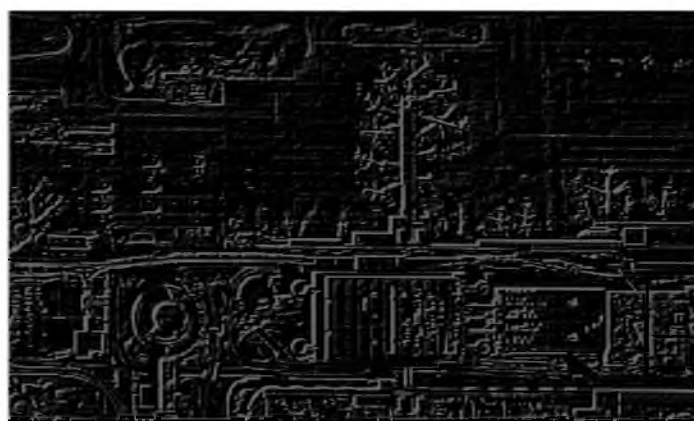


*Рис. 5.* Невязка с исходным изображением при деконволюции с моделированием сингулярностей  
*Fig. 5.* The discrepancy with the original image by deconvolution with the modeling of singularities



*Рис. 6.* Невязка с исходным изображением при деконволюции с регуляризацией методом замены нулевого отсчета в спектре –знаменателе при синтезе частотно-контрастной характеристики на значение 0,01

*Fig. 6.* The discrepancy with the original image at the deconvolution with regularization by replacing the zero point in the spectrum - denominator the synthesis of frequency-contrast characteristics to the value of 0,01



*Рис. 7.* Невязка с исходным изображением при деконволюции с регуляризацией методом замены нулевого отсчета в спектре –знаменателе при синтезе частотно-контрастной характеристики на значение 0,1

*Fig. 7.* The discrepancy with the original image at the deconvolution with regularization by replacing the zero point in the spectrum - denominator the synthesis of frequency-contrast characteristics to the value of 0.1

Легко видеть, что невязка на предлагаемой в работе технологии деконволюции минимальна, а невязки при использовании регуляризации достаточно высоки и невязка при ослаблении степени регуляризации (на значении регуляризирующего параметра 0,01) хотя и меньше по суммарной энергии



невязки на увеличенном значении параметра регуляризации, по структуре насыщена высокочастотными псевдослучайными всплесками, что отмечается во всех литературных источниках и свидетельствует о неустойчивости получаемых решений.

Упомянутая выше и использованная схема регуляризации имеет широкое распространение в соответствующих работах по коррекции космических изображений: в работах [11,12], например, в качестве «блокирующих» нули в знаменателях выражений с участием спектров используются регуляризационные функции, предназначенные на первый взгляд для компенсации спектров шумов.

### Заключение

Разработан метод корректировки результатов функционирования итеративного интегрального оператора деконволюции исходного изображения с отказом от приводящим к квази-решениям регуляризаций имеющих место сингулярностей в синтезируемой ЧКХ тракта, в промежуточных вычислениях и в итоговой формуле коррекции резкости Ван Циттера. Методом обратных преобразований результатов деконволюции показано, что полученные результаты, даже на конечной модели применяемых в качестве моделей сингулярностей показывают существенно меньшее отклонение от исходных изображений, и могут претендовать на использование в перспективных системах сверхразрешения на дальних орбитах (причем без мощных аппаратных нагромождений в виде многосекционных оптико-электронных приборов с управлением ориентациями фокусных осей в зависимости от отклонений орбитальных параметров аппарата от запрограммированных).

### Благодарности

Автор приносит благодарность коллективу Департамента МКА и спутниковых систем ФГУП «Государственный Космический Научно Производственный Центр им. М.В. Хруничева» за поддержку материалами дистанционного зондирования и активное участие в обсуждении и исследовании вопросов улучшения качества космических изображений, в том числе на современных эксплуатируемых космических аппаратах.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00171 "Разработка теоретических основ методов моделирования и алгоритмов представления в обобщенных операциях трактов преобразования дистанционных данных с максимизацией эффективности обработки информации (цифровых космических изображений)".*

### Список литературы References

1. Park S. C., Park M. K., Kang M. G. 2003. Super-resolution image reconstruction: A technical overview. IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 20(3): 21–36.  
Park S. C., Park M. K., Kang M. G. 2003. Super-resolution image reconstruction: A technical overview. IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 20(3): 21–36.
2. Жилев М.Ю., Маторин С.И., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н., Щербинина Н.В. 2014. Специальная коррекция космических изображений высокого и сверхвысокого разрешения. Презентация доклада на Двенадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 10–14 ноября 2014 г. Москва, Институт космических исследований РАН. URL: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/files/presentation/2014/method/zhilenev.pdf3](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/presentation/2014/method/zhilenev.pdf3) (14 ноября 2014).  
Zhilenev M.Ju., Matorin S.I., Vintaev V.N., Ushakova N.N., Shherbinina N.V. 2014. Special'naja korrekciya kosmicheskikh izobrazhenij vysokogo i sverhvyssokogo razreshenija. Prezentacija doklada na Dvenadcatoj Vserossijskoj otкрытой konferencii «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa» 10–14 nojabrja 2014 g. Moskva, Institut kosmicheskikh issledovanij RAN. URL: [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/files/presentation/2014/method/zhilenev.pdf](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/presentation/2014/method/zhilenev.pdf) (accessed 18 February 2013).
3. Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жилев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Адаптивная коррекция процесса восстановления резкости космических изображений высокого разрешения. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. - 2014. - № 8 (179). - Вып. 30/1. - С. 189–199.  
Konstantinov I.S., Shherbinina N.V., Zhilenev M.Ju., Vintaev V.N., Ushakova N.N. Adaptivnaja korrekciya procesa vosstanovlenija rezkosti kosmicheskikh izobrazhenij vysokogo razreshenija. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. - 2014. - № 8 (179). - Вып. 30/1. - С. 189–199.
4. Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жилев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. Специальная коррекция в процедурах регуляризации и итеративных процессах уменьшения размеров пятна функции рассеяния точки на космических изображениях. Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. - 2014. - № 15 (186). - Вып. 31/1. - С. 166–175.  
Konstantinov I.S., Shherbinina N.V., Zhilenev M.Ju., Vintaev V.N., Ushakova N.N. Special'naja korrekciya v procedurah reguljarizacii i iterativnyh processah umen'shenija razmerov pjatna funkicii rassejanija tochki na kosmicheskikh izobrazhenijah. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. - 2014. - № 15 (186). - Вып. 30/1. - С. 166–175.



5. Винтаев В.Н., Жиленев М.Ю., Маторин С.И., Ушакова Н.Н., Щербинина Н.В. 2014. Адаптивное восстановление резкости на цифровых космических изображениях. Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы», №4:33–43.  
Vintaev V.N., Zhilenev M.Ju., Matorin S.I., Ushakova N.N., Shherbinina N.V. 2014. Adaptivnoe vosstanovlenie rezkosti na cifrovyh kosmicheskikh izobrazhenijah. Zhurnal RAN «Informacionnye tehnologii i vychislitel'nye sistemy», №4:33–43.
6. Цибанов В.Н. 2008. Регуляризирующие методы фильтрации и восстановления изображений. Дисс. на соискание ученой степени канд. физ.мат. наук. Москва, 113 с.  
Cibanov V.N. 2008. Reguljarizirujushhie metody fil'tracii i vosstanovlenija izobrazhenij. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. fiz.mat. nauk. Moskva, 113 s.
7. Владимиров В.С. 1967. Уравнения математической физики. М., Наука, 436.  
Vladimirov V.S. 1967. Uravnenija matematicheskoj fiziki. M., Nauka, 436.
8. Коллатц Л. 1969. Функциональный анализ и вычислительная математика. Пер с нем. М., Мир, 447.  
Kollatc L. 1969. Funkcional'nyj analiz i vychislitel'naja matematika. Per s nem. M., Mir, 447.
9. Морен К. 1965. Методы Гильбертова пространства. Пер с польск. М., Мир, 570.  
Moren K. 1965. Metody Gil'bertova prostranstva. Per s pol'sk. M., Mir, 570.
10. Ушакова Н.Н. 2004. Коррекция цифровых космических изображений на основе верифицирующего моделирования. Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Белгород, 255 с.  
Ushakova N.N. 2004. Korrekcija cifrovyh kosmicheskikh izobrazhenij na osnove verificirujushhego modelirovanija. Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Belgorod, 255 s.
11. Остриков В. Н. 2012. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления. В кн.: Техническое зрение в системах управления 2011. Материалы научно-технической конференции (Москва, 15-17 марта 2011 г.). Москва, Изд-во Института космических исследований РАН: т. 38: 16-21.  
Ostrikov V. N. 2012. Ocenka funkcii rassejanija toчки na proizvol'nom snimke posredstvom slepogo vosstanovlenija. V kn.: Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija 2011. Materialy nauchno-tehnicheskoy konferencii (Moskva, 15-17 marta 2011 g.). Moskva, Izd-vo Instituta kosmicheskikh issledovanij RAN: t. 38: 16-21.
12. Кочанов А.А., Обухов А.Г., Просовецкий Д.В. 2010. Методы восстановления изображений и распознавание образов в радиоастрономии. Солнечно-земная физика, №16:154–161.  
Kochanov A.A., Obuhov A.G., Prosoveckij D.V. 2010. Metody vosstanovlenija izobrazhenij i raspoznavanie obrazov v radioastronomii. Solnechno-zemnaja fizika, №16:154–161.