

УДК 004.932:519.652

М.Ю. Катаев, С.М. Бутин

Сравнительный анализ методов повышения пространственного разрешения спутниковых данных LANDSAT-8

Проведено сравнение нескольких методов повышения пространственного разрешения спутниковых изображений, полученных по данным спектрорадиометра LandSat-8. Сравниваются методы Brovey, SFIM, MLT и HPF с помощью критериев корреляции, RMSE и ERGAS. Также для сравнения использовался нормализованный относительный индекс растительности, который в сравнении со статистическими критериями показал важные моменты в сохранении спектральной информации методами повышения разрешения. В работе использовались реальные спутниковые данные Landsat-8.

Ключевые слова: спутниковые изображения, пространственное разрешение, методы обработки, повышение пространственного разрешения.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-67-71

Многоспектральные и гиперспектральные изображения состоят из множества спектральных каналов с высоким спектральным разрешением от видимой до инфракрасной области спектра. Широкий спектральный диапазон в сочетании с высоким спектральным и средним пространственным разрешением (10–100 м) позволяет с определенной точностью выделять и классифицировать типы поверхности. Кроме этих датчиков, на орбите находятся спектральные приборы, которые доказали свою эффективность при решении практических и научных задач (например, MODIS, Landsat). Эти приборы охватывают широкую пространственную область при измерениях, и их относительно низкое пространственное разрешение не позволяет решать задачи пространственного контроля территории. Для этой цели разработаны методики, которые позволяют повысить пространственное разрешение этих измерений за счет комплексирования данных разных спутников или использования панхроматических каналов, имеющих, как правило более высокое пространственное разрешение.

Проблемы, которые несет в себе низкое и среднее пространственное разрешение, связаны с тем, что внутри площади пикселя может быть расположено нескольких типов поверхности (например, вода, песок, лес и др.). Большинство классических классификаторов терпят неудачу при дешифрации пикселей спутникового изображения, где наблюдается смешивание двух и более типов поверхности.

Одним из вариантов решения задачи дешифрирования спектральных данных, заложенных в спутниковых изображениях, является задача спектрального разделения на отдельные компоненты (unmixing). В этой задаче изображение разделяется на сцены, на уровне субпикселей и может предоставить информацию только о пропорциях тех или иных типов поверхности, для которых известны характеристики отражения разнообразных типов поверхности. Однако поскольку пространственное положение типов поверхности в пикселе остается неизвестным, спектральное разделение не приводит к заметному улучшению пространственного разрешения.

Известна методика повышения пространственного разрешения за счет многомерного интерполяции (2D, 3D), и она часто применяется на практике, но не является распространенной, так как сказывается влияние рельефа на точность интерполяции, а значит и на качество повышения пространственного разрешения. Существует обширный класс методик [1–11], решающий задачи повышения пространственного разрешения, в основе которых лежит использование панхроматического канала (panchromatic или PAN). Заметим, что существует два вида построения изображений, это синтезированный RGB, когда каждому цвету соответствует тот или иной спектральный канал, а также индексные изображения, построенные на основе вычисленных предварительно индексов, например, вегетационного индекса NDVI. Важной особенностью методов, которые позволяют повышать пространственное разрешение, является нарушение спектральной природы каналов, что ведет к значительным погрешностям при вычислении индексов.

В данной статье рассматривается несколько методов повышения пространственного разрешения и ищутся методы, которые менее всего нарушают спектральную структуру каналов, что позволяет рассчитать индекс (в данной работе – вегетационный NDVI) с минимальной погрешностью.

Методики повышения пространственного разрешения изображения

Спутники дистанционного зондирования Земли предлагают широкий спектр измеренных изображений с различными характеристиками: пространственными, спектральными, радиометрическими и временными. Изображения, получаемые методами дистанционного зондирования, доступны для использования научным сообществом в цифровой форме. В каждом пикселе изображения, которое известно для того или иного спектрального канала, фиксируется отраженное от поверхности Земли солнечное излучение (в области 0,4–2,5 мкм) или уходящее излучение Земли (в области 3–12 мкм). В результате измерений на изображении фиксируются образы, которые соответствуют разнообразным типам поверхности.

Обзор различных статей по теме [1–16] позволил выделить большую группу методов, разработанных за последние два десятилетия, такие как MLT-алгоритм, модифицированный алгоритм «Брови» (MB), High-Pass «Фильтр» (HPF), алгоритм на основе сглаживающего фильтра модуляции (SFIM), метод главных компонент (PCA), методика интенсивность–оттенок–насыщенность (IHS) и т.д. Все вышеперечисленные методы могут реализовать повышение пространственного разрешения мультиспектральных изображений с помощью изображений с высоким разрешением и сохранить спектральную информацию, правда, в определенной степени. Отметим, что каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, поэтому нами в этой статье оценивается применимость различных методов для изображений спутникового прибора Landsat-8.

Причины выбора методов в основном заключаются в следующем: 1) все они математически схожие, например, все они представляют собой статистические методы, а не методы, связанные с цветом RGB; 2) они просты и удобны в использовании; 3) они могут быть выполнены с любым количеством выбранных входных спектральных каналов.

Метод Brovey Transform

Метод заключается в слиянии видимых спектральных каналов (для Landsat-8 это 30 м пространственное разрешение) с панхроматическим каналом (15 м). Метод позволяет получить визуальные изображения после синтеза (например, используя каналы 4-3-2) с хорошим визуальным качеством, однако сильно искажает спектральную информацию. Метод связан с вычислениями, представленными в формуле (1) для i -го канала видимой спектральной области:

$$B_{\text{brovey}_i} = a \cdot \sum_j \sum_{i=1}^n \frac{B_{\text{low}_i} \cdot B_{\text{high}}}{\sum_{i=1}^n B_{\text{low}_i}}, \quad i=1, \dots, 3, \quad (1)$$

где B_{brovey_i} получено путем слияния изображений низкого разрешения low_i с панхроматическим изображением high , i – номер канала, j – строка пикселей изображения, k – столбец пикселей изображения. В данной работе было принято решение о добавлении коэффициента коррекции a , по причине высокого искажения информации после алгоритма (коэффициент взят равным 3).

Метод HPF Transform

HPF (high-pass filter) – это метод слияния с использованием высокочастотного фильтра. При использовании этого метода повышение разрешения осуществляется за счет переноса высокочастотных составляющих панхроматического канала на спектральные каналы. Производится по формуле (2):

$$B_{\text{HPF}_i} = \sum_j \sum_k \frac{B_{\text{low}_{ijk}} + FB_{\text{high}_{jk}}}{2}, \quad i=1, \dots, 6, \quad (2)$$

где B_{HPF_i} получено слиянием изображения низкого разрешения $B_{\text{low}_{ijk}}$ с изображением $FB_{\text{high}_{jk}}$. Изо-

брожение $FB_{\text{high}_{jk}}$ преобразуется из панхроматического изображения, профильтрованного высокочастотным фильтром.

Метод SFIM Transform

В основе метода лежит сглаживающий фильтр на основе модуляции интенсивности. В отличие от метода HPF, в методе используется низкочастотный фильтр (low-pass filter), который преобразует панхроматическое изображение в изображение B_{mean} . Для преобразования используется уравнение (3):

$$B_{\text{SFIM}_i} = \sum_j \sum_k \frac{B_{\text{low}_{ijk}} \times B_{\text{high}_{jk}}}{B_{\text{mean}_{jk}}}, \quad i=1, \dots, 6, \quad (3)$$

где B_{SFIM_i} получено умножением изображения с низким разрешением на изображение высокого разрешения и делением на изображение высокого разрешения, которое преобразуется низкочастотным фильтром с размером матрицы 5×5 .

Метод MLT Transform

Данный метод объединяет изображение низкого разрешения с изображением высокого разрешения с учетом коэффициентов коррекции a и b . Вычисления проводятся по формуле (4):

$$B_{\text{MLT}_i} = \sqrt{\sum_j \sum_k a \cdot B_{\text{low}_{ijk}} \times b \cdot B_{\text{high}_{jk}}}, \quad (4)$$

где B_{MLT_i} получено слиянием изображения низкого разрешения $B_{\text{low}_{ijk}}$ с изображением высокого разрешения $B_{\text{high}_{jk}}$. Коэффициенты коррекции a и b подбираются вручную или с помощью оптимизационных процедур (что существенно усложняет методику, ввиду большого количества пикселей спутникового изображения).

Критерии сравнения изображений

При использовании методов повышения пространственного разрешения важно выяснить точность получения необходимой информации и насколько один метод отличается от другого, чтобы выбрать лучший. Также авторов статьи волновал вопрос, связанный с сохранением спектральной информации в итоговых изображениях, чтобы переходить к расчету индексов (например, вегетационного NDVI), но уже с более высоким пространственным разрешением, нежели исходное.

Для сравнения изображений будут использоваться следующие критерии:

1. Среднее значение цвета пикселя.
2. Корреляция с исходным снимком.
3. Средняя квадратическая ошибка (RMSE, (5)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (B_{\text{low}} - B_{\text{high}})^2}{MN}}, \quad (5)$$

где B_{low} и B_{high} – значения интенсивности в исходном и итоговом снимках, MN – размер изображения (высота на ширину). Идеальное значение 0, по результатам других исследований [1–7] значения обычно располагаются в диапазоне от 200 до 1500.

4. ERGAS (Relative Global Dimensional Synthesis Error) – это индекс качества, чувствительный к среднему сдвигу и изменению динамического диапазона.

Рассчитывается по формуле (6):

$$ERGAS = 100d \sqrt{\frac{1}{m_\lambda} \sum_{k=1}^{m_\lambda} \left(\frac{RMSE_k}{\mu_k} \right)^2}, \quad (6)$$

где μ_k – среднее значение интенсивности в исходном изображении, RMSE – средняя квадратичная ошибка, k – номер канала, m_λ – количество каналов. Идеальное значение 0, по результатам других исследований [1–7] значения в норме располагаются в диапазоне от 2 до 10.

Также для оценки вычислялся вегетационный индекс $NDVI$ по формуле (7):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (7)$$

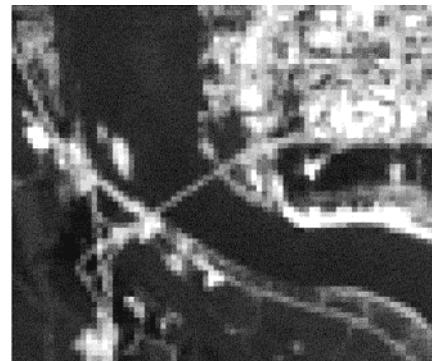
где NIR – значение интенсивности света в ближнем инфракрасном диапазоне, RED – значение интенсивности света в красном канале. Значения индекса для растительности лежат в диапазоне от -1 (отсутствие растительности) до 1 (полнная растительность).

Результаты исследования

В качестве данных для тестирования были взяты спутниковые изображения Landsat-8 от 12 июля 2018 г. Из общей площади изображения снимков была вырезана область, расположенная в окрестности коммунального моста через р. Томь на окраине г. Томска. Данная местность была выбрана из-за своей наглядности и различных типов поверхности, таких как вода, городская застройка, длинный мост и поля с растительностью. Также 12 июля был солнечный, безоблачный день.

Методы примерно дают одинаковые результаты, ближе всего схожесть с оригинальным изображением показывает метод MLT, но связано это с меньшим внедрением информации панхроматического канала (рис. 1).

Также были проведены расчеты вегетационного индекса для каждого метода повышения пространственного разрешения (SFIM, HPF, Brovey и MLT), чтобы увидеть качество расчета $NDVI$ для каждого метода. Методы Brovey и MLT дают заметные искажения по сравнению с оригинальным $NDVI$ (таблица).



а



б

Рис. 1. Сравнение исходного изображения (а) Landsat-8 (30 м на пиксель) и результатов (б) повышения пространственного разрешения (15 на пиксель, метод HPF)

В таблице приведены вычисленные значения критериев сравнения изображений рассматриваемых в статье методов для каналов 2 (синий), 3 (зелёный), 4 (красный).

Сравнение изображений по критериям

(B2 (синий)= 9517,038; B3 (зеленый)= 8804,142; B4 (красный)= 7945,118; B5 (NIR)= 14203,957)

Метод/ Канал	Среднее	Корреляция	RMSE	ERGAS
B2 Brovey	9166,069	0,8735	553,9698	2,9104
B3 Brovey	8481,16	0,9094	525,0714	2,9819
B4 Brovey	7658,881	0,9346	536,1449	3,3740
B5 Brovey	8526,165	0,9200	6643,2649	23,3852
B2 HPF	9516,975	0,8079	539,6692	2,8352
B3 HPF	8802,384	0,8423	560,7662	3,1846
B4 HPF	7944,643	0,8844	631,9626	3,9770
B5 HPF	14122,370	0,9532	1726,3444	6,0769
B2 SFIM	9518,708	0,7918	585,3967	3,0755
B3 SFIM	8806,776	0,8369	582,3145	3,3070
B4 SFIM	7954,05	0,8841	639,1968	4,0225
B5 SFIM	14113,108	0,9469	1840,8793	6,4801
B2 MLT	8955,489	0,9161	649,2033	3,4107
B3 MLT	8614,335	0,9398	357,7712	2,0318
B4 MLT	8183,157	0,9447	442,7167	2,7860
B5 MLT	10690,124	0,9131	4990,8668	17,5685
NDVI исход.	0,2325	1	0	0
NDVI Brovey	0,0341	0,9574	0,2125	45,7155
NDVI HPF	0,2305	0,9569	0,0586	12,6028
NDVI SFIM	0,2297	0,9578	0,0578	12,4439
NDVI MLT	0,1203	0,9573	0,1526	32,8356

Анализ результатов

По результатам работы методов для спектральных каналов Landsat-8 можно сделать вывод, что для синтезированных изображений (спектральные каналы 4, 3, 2) повышение разрешения осуществляется лучше с помощью метода Brovey, но отметим, что остальные методы имеют приблизительно схожие результаты. Картина полностью меняется при исследовании вегетационного индекса NDVI. Метод Brovey дал худший результат, далее следует метод MLT, а лучшими являются методы SFIM и HPF. Все потому, что метод Brovey основан на том, что панхроматический канал является объединением трех видимых каналов и не включает в себя ближний инфракрасный диапазон, а именно этот канал необходим для расчета вегетационного индекса. На основе всего этого можно сделать вывод, что лучшие результаты в плане визуального улучшения и сохранения спектральной информации снимков дают методы SFIM и HPF.

Заключение

В дистанционном зондировании метод повышения пространственного разрешения спутниковых изображений является полезным инструментом для практического использования. Для этого используются панхроматические изображения (PAN) с высоким пространственным разрешением с мультиспектральными изображениями с более низким пространственным разрешением. При этом для одних приложений важна именно визуальная составляющая высокого пространственного разрешения изображений, а для других – сохранение спектральной информации в полученном мультиспектральном изображении. К настоящему времени разработано много методов PAN-улучшения пространственного разрешения с одновременным сохранением спектральных свойств. В данной статье предпринята попытка исследовать несколько методов повышения пространственного разрешения с сохранением спектральных свойств, в основе которых находятся лишь арифметические операции. К таким можно отнести следующие методы: Брови (Brovey), мультиплексивный (MLT), модуляции (HFM) и SFIM-преобразования. Проведенные расчеты показали, что лучше сохранение спектральной информации снимков дают методы SFIM и HPF без потери качества при повышении пространственного разрешения.

Данное исследование проведено в Центре космического мониторинга Земли ТУСУРа.

Литература

1. Palubinskas G. Multi-resolution, multi-sensor image fusion: General fusion framework / G. Palubinskas, P. Reinartz // Proc. Joint Urban Remote Sens. Event. – 2011. – P. 313–316.
2. Knorn J. Land cover mapping of large areas using chain classification of neighboring Landsat satellite images // Remote Sens. Environment. – 2009. – P. 957–964.
3. Zhou J. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data / J. Zhou, D.L. Civco,

J.A. Silander // Int. J. Remote Sens. – 1998. – Vol. 19, No. 4. – P. 743–757.

4. Wu H. Pixel-based image fusion using wavelet transform for SPOT and ETM+ image / H. Wu, Y. Xing // Proc. IEEE Int. Conf. Progr. Informat. Comput. – 2010. – P. 936–940.

5. Zhang J. Remote sensing research issues of the National Land Use Change Program of China / J. Zhang, Y. Zhang // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. – 2007. – Vol. 62, No. 6. – P. 461–472.

6. Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics / C. Thomas, T. Ranchin, L. Wald, J. Chaussot // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2008. – Vol. 46, No. 5. – P. 1301–1312.

7. Adjustable model-based fusion method for multispectral and panchromatic images / L. Zhang, H. Shen, W. Gong, H. Zhang // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern. – 2012. – Vol. 42, No. 6. – P. 1693–1704.

8. Pohl C. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and application / C. Pohl, J.L. Van Genderen // International Journal of Remote Sensing. – 1998. – Vol. 19. – C. 823–854.

9. Park S.C. Super-resolution image reconstruction: A technical overview / S.C. Park, M.K. Park, M.G. Kang // IEEE Signal Process. Mag. – 2003. – Vol. 20, no. 3. – P. 21–36.

10. Image super-resolution via sparse representation / J. Yang, J. Wright, T. Huang, Y. Ma // IEEE Trans. Image Process. – 2010. – Vol. 19, No. 11. – P. 2861–2873.

11. Joshi M.V. Super-resolution imaging: Use of zoom as a cue / M.V. Joshi, S. Chaudhuri, R. Panuganti // Image Vis. Comput. – 2004. – Vol. 22, No. 14. – P. 1185–1196.

12. Zoom-based superresolution reconstruction approach using prior total variation / M.K. Ng, H. Shen, S. Chaudhuri, A.C. Yau // Opt. Eng. – 2007. – Vol. 46, No. 12. – P. 1–11.

13. Huang B. Spatiotemporal reflectance fusion via sparse presentation / B. Huang, H. Song // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2012. – Vol. 50, No. 10. – P. 3707–3716.

14. Two-step sparse coding for the pan-sharpening of remote sensing images / C. Jiang, H. Zhang, H. Shen, L. Zhang // IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens. – 2014. – Vol. 7, No. 5. – P. 1792–1805.

15. Aharon M. K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation / M. Aharon, M. Elad, A. Bruckstein // IEEE Trans. Signal Process. – 2006. – Vol. 54, No. 11. – P. 4311–4322.

16. Duda T. Unsupervised classification of satellite imagery: Choosing a good algorithm / T. Duda, M. Canty // Int. J. Remote Sens. – 2002. – Vol. 23, No. 11. – P. 2193–2212.

Катаев Михаил Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированных

систем управления (АСУ)

Томского государственного университета

систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),

научный руководитель Центра космического

мониторинга ТУСУРа

Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045

Тел.: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85

Эл. почта: kmy@asu.tusur.ru

Бутин Сергей Михайлович

Магистрант ТУСУРа
Вершинина ул., 74, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7-952-802-24-54
Эл. почта: mrserblu@gmail.com

Kataev M.Yu., Butin S.M.

Comparative analysis of the methods of increasing the spatial resolution of satellite data LANDSAT-8

The area of multispectral and hyperspectral methods of sounding the atmosphere and the surface of the Earth is a constantly growing area of application of remote sensing data. The presence in the signal of a large number of spectral channels (wide spectral range), high spectral resolution, allows to detect and classify various types of surface in the observed satellite image. The main problem of multispectral and hyperspectral data is that the spatial resolution of such measurements can vary from several to tens of meters. In addition, numerous factors associated with optical imperfections, atmospheric scattering, lighting effects (geometry of the position of the Sun and the axis of sight relative to the observed territory) and sensor noise also cause deterioration in the quality of the image. This paper discusses the most popular methods for improving the spatial resolution of satellite data and conducts their detailed comparative analysis. The processing of real satellite data Landsat-8 for the territory near Tomsk is given.

Keywords: satellite images, spatial resolution, satellite data processing methods.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-67-71

References

1. Palubinskas G., Reinartz P., Multi-resolution, multi-sensor image fusion: General fusion framework. *Proc. Joint Urban Remote Sens. Event*, 2011, pp. 313–316.
2. Knorn J., Land cover mapping of large areas using chain classification of neighboring Landsat satellite images. *Remote Sens. Environ.*, 2009, vol. 113, no. 5, pp. 957–964.
3. Zhou J., Civco D. L., Silander J. A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *Int. J. Remote Sens.*, 1998, vol. 19, no. 4, pp. 743–757.
4. Wu H., Xing Y. Pixel-based image fusion using wavelet transform for SPOT and ETM+ image. *Proc. IEEE Int. Conf. Progr. Informat. Comput.*, 2010, pp. 936–940.
5. Zhang J., Zhang Y. Remote sensing research issues of the National Land Use Change Program of China. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2007, vol. 62, no. 6, pp. 461–472.
6. Thomas C., Ranchin T., Wald L., Chaussot J. Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2008, vol. 46, no. 5, pp. 1301–1312.
7. Zhang L., Shen H., Gong W., Zhang H. Adjustable model-based fusion method for multispectral and panchromatic images. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, 2012, vol. 42, no. 6, pp. 1693–1704.
8. Pohl C., Van Genderen J.L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and application. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, pp. 823–854.
9. Park S.C., Park M.K., Kang M.G. Super-resolution image reconstruction: A technical overview. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2003, vol. 20, no. 3, pp. 21–36.
10. Yang J., Wright J., Huang T., Ma Y. Image super-resolution via sparse representation. *IEEE Trans. Image Process.*, 2010, vol. 19, no. 11, pp. 2861–2873.
11. Joshi M.V., Chaudhuri S., Panuganti R. Super-resolution imaging: Use of zoom as a cue. *Image Vis. Comput.*, 2004, vol. 22, no. 14, pp. 1185–1196.
12. Ng M.K., Shen H., Chaudhuri S., Yau A.C. Zoom-based superresolution reconstruction approach using prior total variation. *Opt. Eng.*, 2007, vol. 46, no. 12, pp. 1–11.
13. Huang B., Song H. Spatiotemporal reflectance fusion via sparse presentation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2012, vol. 50, no. 10, pp. 3707–3716.
14. Jiang C., Zhang H., Shen H., Zhang L. Two-step sparse coding for the pan-sharpening of remote sensing images. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2014, vol. 7, no. 5, pp. 1792–1805.
15. Aharon M., Elad M., Bruckstein A. K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2006, vol. 54, no. 11, pp. 4311–4322.
16. Duda T., Canty M. Unsupervised classification of satellite imagery: Choosing a good algorithm. *Int. J. Remote Sens.*, 2002, vol. 23, no. 11, pp. 2193–2212.

Mikhail Yu. Kataev

Doctor of Engineering, Professor,
Department of Automated Control Systems (ACS),
Scientific Leader of the Center for Space Monitoring
Tomsk State University of Control Systems
and Radio Electronics (TUSUR)
74, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7 (382-2) 70-15-36, +7-960-975-27-85
Email: kmy@asu.tusur.ru

Sergey M. Butin

Master student TUSUR
74, Vershinin st., Tomsk, Russia, 634045
Phone: +7-952-802-24-54
Email: mrserblu@gmail.com