

Использование различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 для оценки природных сред и объектов (обзор)

© 2017. Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, зав. лабораторией,
Г. Я. Кантор^{1,2}, к. т. н., научный сотрудник,

¹ Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36,

² Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28,
e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

Программа дистанционного зондирования Земли из космоса Landsat начала свою работу в июле 1972 г. с запуска спутника Landsat 1 (США). В настоящее время на орбите работают два аппарата этой серии – Landsat 7 и Landsat 8. Landsat 7 близок к исчерпанию технического ресурса, поэтому основным источником актуальных космических снимков является спутник Landsat 8. Космические снимки, полученные со спутника Landsat 8, широко используются для решения научных и практических задач, связанных с оперативным спутниковым контролем природных ресурсов, исследованием динамики протекания природных процессов и явлений, анализом причин, прогнозированием возможных последствий и выбором способов предупреждения чрезвычайных ситуаций. По сравнению с предыдущими аппаратами серии спектральный диапазон аппаратуры Landsat 8 расширен за счёт двух новых каналов, которые позволяют проводить изучение водных объектов и аэрозолей.

Различные комбинации каналов видимого и ближнего инфракрасного излучения используются для решения большого числа тематических задач: классификация и анализ состояния растительного покрова; изучение сельскохозяйственных земель, водно-болотных угодий; анализ состояния водных объектов; классификация изменений в лесных массивах; картографирование таксационно-биометрических характеристик лесных насаждений; определение запасов древесных пород; картографирование почв; изучение динамики пожаров и пост-пожарного анализа территории. Комбинации различных каналов спутника Landsat 8 зависят от условий конкретной сцены (район, сезон съёмки и т. д.).

Возможности использования различных комбинаций спектральных каналов космических снимков спутника Landsat 8 в данной работе рассмотрены на примере двух участков территории Кировской области, различающихся по степени антропогенной нагрузки – Государственный природный заповедник «Нургуш» и областной центр Кировской области (г. Киров). Использование данного инструментария космических снимков позволяет выявлять различные характеристики природных экосистем на больших территориях без проведения дополнительных полевых исследований.

Ключевые слова: Landsat 8, комбинации каналов, многозональные космические снимки, природные объекты.

Use of various combinations of spectral channels of satellite images from the Landsat 8 satellite for an assessment of natural environments and objects (review)

T. A. Adamovich¹, T. Ya. Ashikhmina^{1,2}, G. Ya. Kantor^{1,2},

¹ Vyatka State University,

36 Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

² Institute of Biology of Komi Scientific Center of the Ural Branch of RAS,

28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: ttjnadamvich@rambler.ru

The Landsat program of remote sensing of Earth from space has been started in July, 1972 with launch of the first Landsat satellite in USA. Now two space vehicles of this series – Landsat 7 and Landsat 8 work at their orbits. Landsat 7 is close to exhaustion of a technical resource therefore the main source of urgent imagery is the Landsat 8 satellite. The satellite images received from the Landsat 8 are widely used for the solution of the scientific and practical tasks related

to operational control of natural resources, a research of dynamics of natural processes and the phenomena, the analysis of the reasons, forecasting of possible consequences and the choice of ways of the prevention of emergency situations. In comparison with the previous devices of a series the spectral range of the Landsat 8 equipment is expanded at the expense of two new channels which allows to carry out studying of water objects and aerosols.

Various combinations of channels of visible and near infrared radiation are used for the solution of a large number of thematic tasks: classification and analysis of a condition of a vegetable cover; studying of farmlands, wetlands; analysis of a condition of water objects; classification of changes in forests; mapping of economic and biometric characteristics of forest plantings; definition of stocks of tree species; mapping of soils; studying of dynamics of the fires and post-fire analysis of the territory. Combination of various channels of the Landsat 8 satellite for research depends on conditions of a concrete scene (the area, a shooting season etc.).

The possibilities of use of various combinations of spectral channels of satellite imagery from the Landsat 8 satellite are considered in this paper on the example of two sites of the territory of the Kirov region differing on degree of anthropogenic load – the State Nature Reserve “Nurgush” and the administrative center of the Kirov region (city of Kirov). Use of these tools of satellite imagery allows revealing various characteristics of natural ecosystems in large territories without carrying out extra field researches.

Keywords: Landsat 8, combinations of channels, multispectral satellite images, natural objects.

Введение

В настоящее время на орбите находится более 100 космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), выполняющих съёмку в различных спектральных каналах и с разным разрешением, с высокой точностью, периодичностью и производительностью [1].

Программа Landsat – наиболее продолжительный проект по получению спутниковых фотоснимков планеты Земля [2]. Данные, получаемые при помощи Landsat, используются при решении большого числа тематических задач, включая измерение площади растительного покрова и его классификацию [3, 4], определение состояния сельскохозяйственных культур [5], геологическое картирование [6], контроль эрозии почв в береговой зоне и т. д.

Спутники серии Landsat являются важнейшим источником общедоступных спектрально-зональных космических снимков 30-метрового разрешения [7], широко используемых для тематического картографирования поверхности Земли и мониторинга различных природных процессов и объектов, в том числе лесов [8]. Снимки спутников этой серии внесли огромный вклад в развитие наук о Земле во всем мире, в частности в России.

Первый спутник серии Landsat (ERTS-1, Earth Resources Technology Satellite 1) был запущен на орбиту 23 июля 1972 г. в США [9]. Космические снимки с данного спутника имели разрешение 80 м, съёмка велась в 4 спектральных диапазонах. Предшественники Landsat 8 (4, 5, 7) поставляли снимки в 8 спектральных диапазонах с пространственным разрешением от 15 до 60 метров.

В настоящее время наиболее актуальные спутниковые данные можно получить

со спутника Landsat 8. Он был выведен на орбиту 11 февраля 2013 г. [10]. Его снимки имеют разрешение 30 м в 9 спектральных каналах, 7 из которых близки к тем, которые использовались в более ранних инструментах Thematic Mapper (TM) и Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) на предыдущих спутниках Landsat [11, 12]. За счёт этого обеспечивается преемственность и совместимость с ранее накопленным массивом данных Landsat [13–15]. Два дополнительных спектральных канала позволяют проводить изучение водных объектов и аэрозолей [16].

Landsat 8 вращается вокруг Земли по гелиосинхронной орбите высотой 705 км, облетая Землю каждые 98,9 минут и пересекая экватор в десять часов утра. Вся поверхность Земли (за исключением полярных областей) покрывается снимками этого спутника каждые 16 дней [17, 18]. Спутник Landsat 8 получает данные, используя два набора инструментов: Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS) [19, 20]. Первый набор получает изображения в 9 диапазонах видимого света и ближнего инфракрасного излучения (ИК), второй набор – в 2 диапазонах дальнего (теплого) ИК с разрешением 100 м (табл.). Спутник рассчитан на срок активного существования в течение 5,25 лет, однако запас топлива позволяет использовать его до 10 лет.

Канал 1 чувствителен к тёмно-синим и фиолетовым цветам. Синий цвет трудно различать из космоса, так как он хорошо рассеивается на пыли и частичках воды в воздухе, а также на самих молекулах воздуха. Этот диапазон также называется побережным или аэрозольным, согласно двум новым основным видам применения: в нём видно мелководье и мельчайшие частички пыли и дыма в воздухе [21].

Спектральные каналы спутника Landsat 8 OLI

№ канала	Название канала	Длины волн, мкм	Разрешение, м
1	побережья и аэрозоли	0,433–0,453	30
2	синий	0,450–0,515	30
3	зелёный	0,525–0,600	30
4	красный	0,630–0,680	30
5	ближний ИК	0,845–0,885	30
6	ближний ИК	1,560–1,660	30
7	ближний ИК	2,100–2,300	30
8	панхроматический	0,500–0,680	15
9	перистые облака	1,360–1,390	30
10	дальний ИК	10,30–11,30	100
11	дальний ИК	11,50–12,50	100

Каналы 2, 3 и 4 представляют собой видимые синий, зелёный и красный диапазоны.

Канал 5 измеряет ближний инфракрасный спектр. Он особенно важен для экологов, поскольку листья здоровых растений имеют высокий коэффициент отражения в этой части спектра. Данные с этого канала в сочетании с другими каналами используются для расчёта различных вегетационных индексов, например, NDVI (**N**ormalized **D**ifference **V**egetation **I**ndex – нормализованный разностный вегетационный индекс) [22]. Индексы данной группы позволяют проводить классификацию растительности и оценивать её состояние [23].

Каналы 6 и 7 покрывают разные участки коротковолнового инфракрасного диапазона. Они дают возможность отличить сухую землю от влажной, а также скалы и почвы [24], которые плохо различимы в других диапазонах, но хорошо – в инфракрасной области спектра.

Канал 8 – панхроматический. Он воспринимает больше света и даёт самую чёткую картинку среди всех диапазонов. Его разрешение составляет 15 метров.

Канал 9 – это одна из самых интересных особенностей Landsat 8. Он покрывает очень узкую полосу длин волн – 30 нанометров [25]. Немногие из космических инструментов регистрируют эту область спектра, так как она почти полностью поглощается атмосферой. Landsat 8 использует это как преимущество. Поскольку земля в этом диапазоне едва различима, значит всё, что в нём ярко видно, либо отражает очень хорошо, либо находится вне атмосферы. В 9-м канале видны только облака, которые представляют реальную проблему для спутниковых снимков, так как из-за размытых краёв плохо различимы в обычных диапазонах, а снимки, сделанные сквозь них,

могут иметь расхождения с другими. С помощью канала 9 это легко отследить.

Каналы 10 и 11 регистрируют тепловое инфракрасное излучение. Данные каналы позволяют измерять температуру поверхности Земли [26, 27].

Космические снимки, полученные со спутника Landsat 8, решают следующие научные и практические задачи [28]:

1) сбор и сохранение многоспектральных изображений среднего разрешения (30 м) не менее, чем в течение 5 лет;

2) сохранение геометрии, калибровки, покрытия, спектральных характеристик, качества изображений и доступности данных на уровне, аналогичном предыдущим спутникам программы Landsat.

Одним из преимуществ Landsat 8 является улучшенная геометрия снимков [10]. Данные из невидимых диапазонов спектра позволяют анализировать множество разных аспектов, начиная с типов поверхности, заканчивая ростом сельскохозяйственных культур и природными катастрофами по всему миру.

В данной работе для иллюстрации различных возможностей применения комбинаций спектральных каналов использовались снимки с космического аппарата Landsat 8 для двух участков на территории Кировской области, различающихся по степени антропогенной нагрузки – Государственный природный заповедник «Нургуш» и областной центр Кировской области (г. Киров). Для анализа объектов земной поверхности использовали различные комбинации спектральных каналов космических снимков, сделанных с аппарата Landsat 8 за июнь 2016 г. (территория заповедника «Нургуш») и август 2015 г. (территория города Кирова) (рис. 1–6, см. цв. вкладку). Обработку космических снимков проводили в программе

ENVI 5.2 [29]. Особенностью программного комплекса ENVI является то, что для визуализации многоспектрального космического снимка можно использовать три любых спектральных канала, отобразив их в основных цветах монитора – красном, зелёном и синем (RGB). Например, комбинация каналов 5-6-2 означает, что ближний ИК-диапазон (0,845–0,885 мкм) отображается на экране красным цветом, диапазон 1,560–1,660 мкм – зелёным, а видимый диапазон 0,450–0,515 мкм – синим.

Характеристика комбинаций каналов спутника Landsat 8

Комбинация каналов 5-4-3

Это стандартная комбинация, которая носит название «искусственные цвета» (рис. 1, цв. вкладка). Растительность отображается в оттенках красного, городская застройка – зелёно-голубых, а цвет почвы варьируется от тёмно- до светло-коричневого. Лёд, снег и облака выглядят белыми или светло-голубыми. Хвойные леса будут выглядеть более тёмно-красными или даже коричневыми по сравнению с лиственными лесами. В целом, насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой и (или) широколиственной растительности, в то время как более светлые оттенки характеризуют травянистую или редколесья и кустарниковую растительность. Эта комбинация очень популярна и используется, в основном, для изучения состояния растительного покрова, в частности, для мониторинга биоразнообразия лесов [30]. Кроме того, данное сочетание каналов позволяет проводить мониторинг дренажа и почвенной мозаики [31]. Интересна данная комбинация для исследования сезонной динамики спектрально-отражательных свойств агрокультур [32].

Комбинация каналов 4-3-2

Данная комбинация называется «естественные цвета» (рис. 2, цв. вкладка). Здесь используются каналы видимого диапазона, поэтому объекты земной поверхности выглядят похожими на то, как они воспринимаются человеческим глазом. Здоровая растительность выглядит зелёной, убранные поля – светлыми, угнетённая растительность – коричневой и жёлтой, дороги – серыми, береговые линии – белёсыми. Эта комбинация каналов даёт возможность анализировать состояние водных объектов [33, 34] и процессы седиментации, оценивать глубины. Такое сочетание каналов

позволяет изучать антропогенные объекты [35, 36]. Недостатками данной комбинации является плохое детектирование вырубок и разреженной растительности, трудное отделение одного типа растительности от другого. Кроме того, такое сочетание каналов не позволяет отличить мелководье от почв.

Комбинация каналов 7-5-3

Такая комбинация даёт изображение близкое к естественным цветам, но в то же время позволяет анализировать состояние атмосферы и дым (рис. 3, цв. вкладка). Здоровая растительность выглядит ярко-зелёной, травянистые сообщества – зелёными, ярко-розовые участки детектируют открытую почву, коричневые и оранжевые тона характерны для разреженной растительности. Сухостойная растительность выглядит оранжевой, вода – голубой.

Песок, почва и минералы могут быть представлены очень большим числом цветов и оттенков. Эта комбинация даёт хороший результат при анализе пустынь и опустыненных территорий [37]. Кроме того, может быть использована для изучения сельскохозяйственных земель [38] и водно-болотных угодий [39]. Эта комбинация используется для изучения динамики пожаров и пост-пожарного анализа территории [40–42]. Выгоревшие территории будут выглядеть ярко-красными. Городская застройка отображается в оттенках розово-фиолетового, травянистые сообщества – зелёными и светло-зелёными. Светло-зелёные точки внутри городских территорий могут быть парками, садами. Оливково-зелёный цвет характерен для лесных массивов, а более тёмный цвет является индикатором примеси хвойных пород.

Комбинация каналов 5-6-2

При данном сочетании каналов здоровая растительность отображается в оттенках красного, коричневого, оранжевого и зелёного. Почвы могут выглядеть зелёными или коричневыми, урбанизированные территории – белёсыми, серыми и зелёно-голубыми, ярко-голубой цвет может детектировать недавно вырубленные территории [43], а красноватый цвет характеризует восстановление растительности или разреженную растительность. Чистая, глубокая вода будет выглядеть тёмно-синей (почти чёрной), если же это мелководье или в воде содержится большое количество взвесей, то в цвете будут преобладать более светло-синие оттенки. Данная комбинация

каналов может быть использована в оценке показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде [44]. Сочетание каналов позволяет детектировать здоровую растительность, почвы [45]. Добавление среднего инфракрасного канала позволяет добиться хорошей различимости возраста растительности.

Комбинация каналов 5-6-4

Эта комбинация ближнего, среднего ИК-каналов и красного видимого канала позволяет чётко различить границу между водой и сушией и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона (рис. 4, цв. вкладка). С большой точностью будут детектироваться водные объекты внутри суши [46, 47]. Комбинация позволяет анализировать влажность, она полезна при изучении почв и растительного покрова [48, 49].

Комбинация каналов 7-6-4

Данная комбинация даёт изображение близкое к естественным цветам (рис. 5, цв. вкладка). Растительность отображается в оттенках тёмно- и светло-зелёного, урбанизированные территории выглядят белыми, зелёно-голубыми и малиновыми, почвы, песок и минералы могут быть очень разных цветов. Практически полное поглощение излучения в среднем ИК-диапазоне водой, снегом и льдом позволяет очень чётко выделять береговую линию и подчеркнуть водные объекты на снимке. Горячие точки (как, например, кальдеры вулканов и пожары) выглядят красноватыми или жёлтыми [50]. Одно из возможных применений этой комбинации каналов – мониторинг пожаров [51].

Комбинация каналов 7-6-5

Комбинация не включает ни одного канала из видимого диапазона, и обеспечивает оптимальный анализ состояния атмосферы (рис. 6, цв. вкладка). Береговые линии чётко различимы. Такое сочетание каналов может быть использовано для анализа текстуры и влажности почв [52].

Заключение

Приведённый анализ сочетаний каналов позволяет понять, что при помощи космических снимков возможно выявление различных характеристик природных экосистем на больших территориях с меньшим объёмом полевых работ [53].

Таким образом, накопленные к настоящему времени архивы космических снимков со спутников Landsat, полученных бортовыми сенсорами TM и ETM, OLI и TIRS, открывают уникальную возможность использования космических снимков среднего пространственного разрешения для оперативного спутникового контроля природных ресурсов, исследования динамики протекания природных процессов и явлений, анализа причин, прогнозирования возможных последствий и выбора способов предупреждения чрезвычайных ситуаций [54]. Разрабатываются методы детектирования и классификации изменений в лесных массивах на основе анализа разновременных спутниковых данных Landsat. На основе материалов космической съёмки осуществляется картографирование таксационно-биометрических характеристик лесных насаждений [55], определение запасов древесных пород [56]. Кроме того, мультиспектральные космические снимки Landsat 8 позволяют выявлять особенности ландшафтов с целью создания карты элементов среды обитания охотничьих ресурсов [57]. В 2023 г. планируется вывод на орбиту спутника Landsat 9, который будет в основном копировать его предшественника [58].

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-2120.2017.5).

Литература

1. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
2. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Москва: Техносфера, 2008. 312 с.
3. Миклашевич Т.С., Барталев С.А. Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24.
4. Olsson H. A method for using Landsat time series for monitoring young plantations in boreal forests // International Journal of Remote Sensing. 2009. № 30 (19). P. 5117–5131.
5. Сидько А.Ф., Шевырнов А.П. Спектральная яркость растений, как основа дистанционной диагностики посевов сельскохозяйственных культур // ДАН. 1997. Т. 354. № 1. С. 120–122.

6. Журавель Ю.Н., Федосеев А.А. Эффективность использования мультиспектральных и гиперспектральных данных дистанционного зондирования в задачах мониторинга окружающей среды // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 4 (42). С. 38–48.
7. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Издательство А и Б, 1997. 296 с.
8. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Полевщикова Ю.А., Лежнин С.А. Оценка динамики нарушенности лесного покрова в среднем Поволжье по снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 124–134.
9. Smith J.A., Tzeu L.L., Ranson K.J. The lambertian assumption and Landsat data // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 1980. V. 46. P. 1183–1189.
10. Meyer P., Itten K.I., Kellenberger T., Sandmeier S., Sandmeier R. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 1993. V. 48. P. 17–28.
11. Саворский В.П., Смирнов М.Т., Тищенко Ю.Г. Справочно-информационная система спутникового мониторинга Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 1. С. 198–205.
12. Кошко А. А. Спутник дистанционного зондирования Земли Landsat 8 // Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов. Материалы международной научно-технической интернет-конференции.
13. Sharing Earth Observation Resources [Электронный ресурс]: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-8-ldcm>. (Дата обращения 08.06.2017).
14. Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // Remote Sensing of Environment. 2014. № 145. P. 154–172.
15. Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Бурцев М.А. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27.
16. Лупян Е.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Мазуров А.А., Мальцев Д.В., Матвеев А.А., Прошин А.А., Топлин В.А., Халикова О.А., Крашениникова Ю.С. Возможности работы с долговременным архивом данных спутников Landsat по территории России и приграничных стран // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 307–315.
17. Neil flood continuity of reflectance data between Landsat-ETM+ and Landsat-8 OLI, for both top-of-atmosphere and surface reflectance: A study in the Australian landscape // Remote Sens. 2014. № 6. P. 7952–7970.
18. Голицын Г.С., Руткевич Б.П., Руткевич П.Б. Нижняя граница облачности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 1. С. 263–269.
19. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, L8DS-1574, version 1.0. Sioux Falls, USA: USGS EROS, 2015. 98 p.
20. James S., Choate M., Moe D. Landsat 8 thermal infrared sensor geometric characterization and calibration // Remote Sensing 6. 2014. № 11. P. 11153–11181.
21. Белова Е.И., Ершов Д.В. Методика создания безоблачных композитных изображений по спутниковым данным LANDSAT // Восьмая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». 2010. С. 33–34.
22. Черепанов А.С. Вегетационные индексы: справочные материалы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
23. Лиджиева Н.Ц., Уланова С.С., Федорова Н.Л. Опыт применения индекса вегетации (NDVI) для определения биологической продуктивности фитоценозов аридной зоны на примере региона Чёрные земли // Известия Саратовского университета. Сер. Химия. Биология. Экология. 2012. Т. 12. Вып. 2. С. 94–96.
24. Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. М.: Аспект Пресс, 2005. 190 с.
25. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
26. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
27. Гаркуша И.Н. Автоматизация процессов обработки космоснимков в задачах теплового картографирования городов // Зб. наук праць НГУ. Д.: Национальний горний університет. 2013. № 40. С. 114–120.
28. Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я., Савиных В.П. Применение данных Landsat 8 при изучении природных комплексов // Экология родного края: проблемы и пути их решения: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Книга 1. Киров: ВятГУ, 2017. С. 19–22.
29. Объединение многоканальных данных в единый файл в ENVI [Электронный ресурс]: **GIS-Lab Географические информационные системы и дистанционное зондирование**. Режим доступа: <http://gis-lab.info> (Дата обращения 08.06.2017).
30. Исаев А.С. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов // Исследования земли из космоса. 2009. № 2. С. 1–12.
31. Савин И.Ю., Симакова М.С. Спутниковые технологии для инвентаризации и мониторинга почв России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 104–115.

32. Беляев Б., Кизяк Е., Хрущева Е. Исследование сезонной динамики спектрально-отражательных свойств агрокультур Беларуси на основе полевого спектрометрирования и материалов дистанционного зондирования Земли // *Земля Беларуси*. 2016. № 2. С. 42–46.
33. Курганович К.А., Носкова Е.В. Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала содовых озёр Юго-Востока Забайкалья по данным дистанционного зондирования // *Вестник ЗабГУ*. 2015. № 6 (121). С. 16–24.
34. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2014. № 140. P. 23–35.
35. Климанова О. А., Оспанов А. Е. Опыт использования карт региональных атласов и снимков Landsat-5, 7, 8 для анализа трансформации землепользования в Северном Казахстане в 1953–2015 гг. // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка*. 2016. Т. 60. № 5. С. 13–19.
36. Корниенко С.Г. Оценка влияния разработки Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения на состояние территории лесотундры по данным ИСЗ Landsat // *Исследование Земли из космоса*. 2009. № 4. С. 78–87.
37. Цыдыпов Б.З., Миронов И.А., Куликов А.И. Выявление опустыненных территорий на основе комплексного анализа мультиспектральных (Landsat) и радарных (SRTM) спутниковых данных // *Вестник ИрГТУ*. 2012. № 4. С. 67–73.
38. Повх В.И., Гарбузов Г.П., Шляхова Л.А. Космический мониторинг сельскохозяйственных угодий Ростовской области // *Исследование Земли из космоса*. 2006. № 3. С. 89–96.
39. Мартынюк В.А. Мониторинг площадей озерно-болотных систем региона по материалам дистанционного зондирования Земли // *Мониторинг окружающей среды: сб. материалов II международной науч.-практ. конф. Брест: БрГУ, 2013. С. 118–121.*
40. Барталев С.А., Беляев А.И., Егоров В.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Коршунов Н.А., Котельников Р.В., Лупян Е.А. Валидация результатов выявления и оценки площадей, поврежденных пожарами лесов по данным спутникового мониторинга // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сборник научных статей. М.: GRANP polygraph, 2005. Т. 2. С. 343–353.*
41. Барталев С.А., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Панова О.Ю., Ефремов В.Ю. Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
42. Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshelev V.V., Tashchilin S.A., Tatarnikov A.V., Csiszar I., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I., Afonin S.V., Belov V.V., Matvienko G.G., Loboda T.V. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2006. № 11. P. 113–145.
43. Сидоренков В.М., Дорощенко Э.В., Жафяров А.В., Ильин Ф.С. Оценка потенциала различных видов рубок на основе анализа спутниковых данных Landsat-8 // *Лесотехнический журнал*. 2015. Т. 5. №1 (17). С. 97–109.
44. Тихомиров О.А., Бочаров А.В., Комиссаров А.Б., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Ивановского водохранилища // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*. 2016. № 2. С.230–244.
45. Сборишук Ю.Н. Дистанционные методы инвентаризации и мониторинга почвенного покрова. М.: Изд-во МГУ, 1992. Ч. 1. 86 с.
46. Терехов А.Г., Пак И.Т., Долгих С.А. Данные Landsat 5, 7, 8 и WVN в задаче мониторинга гидрологического режима Капшагайского водохранилища на реке Текес (Китайская часть бассейна реки Иле) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 6. С. 174–182.
47. Силкин К.Ю. Методика оценки экологического состояния Воронежского водохранилища по материалам многозонального дистанционного зондирования // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2012. № 1. С. 220–223.
48. Лаверов Н.П., Попович В.В., Ведешин Л.А., Гальяно Ф.Р. Методы анализа данных дистанционного зондирования Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 6. С. 145–153.
49. Li S., Chen X. A new bare-soil index for rapid mapping developing areas using Landsat 8 data // *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: ISPRS technical commission IV symposium. V. XL-4. Suzhou, China*. 2014. P. 139–144.
50. Горный В.И. Космические измерительные методы инфракрасного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2004. Т. 2. № 1. С. 10–16.
51. Куулар Х.Б. Оценка гарей Уюкского хребта на основе данных Landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 4. С. 239–244.
52. Жиленев М.Ю. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке // *Геоматика*. 2009. № 3. С. 56–64.
53. Евдокимов С.И., Михалап С.Г. Определение физического смысла комбинации каналов снимков Landsat

для мониторинга состояния наземных и водных экосистем // Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки». 2015. № 7. С. 21–32.

54. Книжников Ю.Ф. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Изд-во «Академия». 2004. 336 с.

55. Терехин Э. А. Эмпирическая оценка и картографирование таксационно-биометрических характеристик лесных насаждений по материалам космической съёмки Landsat TM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 122–130.

56. Сочилова Е.Н., Ершов Д.В. Анализ возможности определения запасов древесных пород по данным Landsat ETM // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 277–282.

57. Смышляков С.Г. Особенности дешифрирования ландшафтов по мультиспектральным космическим снимкам для создания карты элементов среды обитания охотничьих ресурсов // Геоматика. Москва: Совзонд. 2013. № 1. С. 53–62.

58. Quinn W.J. Band combination [Электронный ресурс]: URL: <http://web.pdx.edu/~emch/ip1/bandcombinations.html> (Дата обращения 08.06.2017).

References

1. Kashkin V.B., Sukhinin A.I. Remote sensing of the Earth from space. Digital Image Processing. М.: Logos, 2001. 264 p. (in Russian).

2. Chandra A.M., Gosh S.K. Remote sensing and geographic information systems. М.: Tekhnosfera, 2008. 312 p. (in Russian).

3. Miklashevich T.S., Bartalev S.A. Method for determination of phenological characteristics of vegetation cover on the basis of time series of satellite data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. V. 13. № 1. P. 9–24 (in Russian).

4. Olsson H. A method for using Landsat time series for monitoring young plantations in boreal forests // International Journal of Remote Sensing. 2009. № 30 (19). P. 5117–5131.

5. Sidko A.F., Shevyrnogov A.P. Spectral brightness of plants, as a basis for remote diagnosis of agricultural crops // DAN. 1997. Т. 354. № 1. P. 120–122 (in Russian).

6. Zhuravel Yu.N., Fedoseyev A.A. Efficiency of using multispectral and hyperspectral remote sensing data in environmental monitoring tasks // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2013. № 4 (42). P. 38–48 (in Russian).

7. Garbuk S.V., Gershenson V.E. Satellite remote sensing systems of the Earth. М.: Izdatelstvo A i B, 1997. 296 p. (in Russian).

8. Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A. Assessment of the dynamics of disturbance of forest cover in the middle of the Volga region from Landsat images // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. V. 13. № 4. P. 124–134 (in Russian).

9. Smith J.A., Tzeu L.L., Ranson K.J. The lambertian assumption and Landsat data // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1980. V. 46. P. 1183–1189.

10. Meyer P., Itten K.I., Kellenberger T., Sandmeier S., Sandmeier R. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 1993. 48. P. 17–28.

11. Savorskiy V.P., Smirnov M.T., Tishchenko Yu.G. Reference information system on satellite monitoring of the Earth // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2006. V. 3. № 1. P. 198–205 (in Russian).

12. Koshko A.A. Earth remote sensing satellite Landsat 8 // Real estate cadastre and monitoring of natural resources. Materials of the international scientific and technical Internet conference (in Russian).

13. Sharing Earth Observation Resources [Internet resource]: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-8-ldcm>. (Date of the application 08.06.2017).

14. Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research // Remote Sensing of Environment. 2014. № 145. P. 154–172.

15. Proshin A.A., Lupyan E.A., Balashov I.V., Kashnitskiy A.V., Burtsev M.A. Creation of a unified system for maintaining satellite data archives intended for building modern remote monitoring systems // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. V. 13. № 3. P. 9–27 (in Russian).

16. Lupyan E.A., Balashev I.V., Burtsev M.A., Efremov V.Yu., Mazurov A.A., Maltsev D.V., Matveyev A.A., Proshin A.A., Toplin V.A., Khalikova O.A., Krashennikova Yu.S. Possibilities of working with a long-term archive of Landsat satellite data across Russia and border countries // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 3. P. 307–315 (in Russian).

17. Neil flood continuity of reflectance data between Landsat-ETM+ and Landsat-8 OLI, for both top-of-atmosphere and surface reflectance: A study in the Australian landscape // Remote Sens. 2014. № 6. P. 7952–7970.

18. Golitsyn G.S., Rutkevich B.P., Rutkevich P.B. Lower cloud limit // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2006. V. 3. № 1. P. 263–269 (in Russian).

19. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, LSDS-1574, version 1.0. Sioux Falls, USA: USGS EROS, 2015. 98 p.

20. James S., Choate M., Moe D. Landsat 8 thermal infrared sensor geometric characterization and calibration // Remote Sensing 6. 2014. № 11. P. 11153–11181.

21. Belova E.I., Ershov D.V. Method for creating cloudless composite images using satellite data LANDSAT // The 8-th open All-Russian conference "Modern problems of Earth remote sensing from space: Physical basics, methods and technologies for monitoring the environment, potentially Hazardous Phenomena and Objects". 2010. P. 33–34 (in Russian).
22. Cherepanov A.S. Vegetation indices: reference materials // Geomatika. 2011. № 2. P. 98–102 (in Russian).
23. Lidzhiyeva N.Ts., Ulanova S.S., Fedorova N.L. The experience of using the vegetation index (NDVI) to determine the biological productivity of phytocenoses of the arid zone in the example of the region Chernyye Zemli (Black Lands) // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Ser. Khimiya. Biologiya. Ekologiya. 2012. V. 2. № 12. P. 94–96 (in Russian).
24. Kravtsova V.I. Space methods of soil investigation. M.: Aspekt Press, 2005. 190 p. (in Russian).
25. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radiovision. Radar systems for remote sensing of the Earth. Textbook for high schools. M.: Radiotekhnika, 2005. 368 p. (in Russian).
26. Shovengerdt R.A. Remote sensing. Models and methods of image processing. M.: Tekhnosfera, 2010. 560 p. (in Russian).
27. Garkusha I.N. Automation of processes of satellite images in problems of thermal mapping of cities // Zb. nauk prats NGU. D.: Natsionalnyy gornyy universitet. 2013. № 40. P. 114–120 (in Russian).
28. Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya., Savinykh V.P. Application of Landsat 8 data in the study of natural complexes // Ecology of the native land: problems and ways of their solution: Materials of 12-th All-Russia scientific and practical conference with international participation. Book 1. Kirov: VyatGU, 2017. P. 19–22 (in Russian).
29. Combining multichannel data into a single file in ENVI (Obyedineniye mnogokanalnykh dannykh v edinyy fayl v ENVI) // GIS-Lab: Geographic information systems and remote sensing [Internet resource]: <http://gis-lab.info> (Date of the application 08.06.2017) (in Russian).
30. Isayev A.S. Use of satellite data for monitoring of forest biodiversity // Issledovaniye zemli iz kosmosa. 2009. № 2. P. 1–12 (in Russian).
31. Savin I.Yu., Simakova M.S. Satellite technologies for soil inventory and monitoring in Russia // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 5. P. 104–115 (in Russian).
32. Belyayev B., Kizyak E., Khrushcheva E. Research of seasonal dynamics of spectral-reflective properties of agricultural crops in Belarus based on field spectrometry and remote sensing materials of the Earth // Zemlya Belarusi. 2016. № 2. P. 42–46 (in Russian).
33. Kurganovich K.A., Noskova E.V. The use of water indices to assess the change in the area of the water mirror of the soda lakes of the Southeast of the Transbaikal according to remote sensing data // Vestnik ZabGU. 2015. № 6 (121). P. 16–24 (in Russian).
34. Feyisa G.L., Meilby H., Fensholt R., Proud S.R. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2014. № 140. P. 23–35.
35. Klimanova O.A., Ospanov A.E. Experience of using maps of regional atlases and images from Landsat-5, 7, 8 for analysis of land use transformation in Northern Kazakhstan in 1953-2015 // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka. 2016. V. 60. № 5. P. 13–19 (in Russian).
36. Korniyenko S.G. Assessment of the impact of the development of the Urengoy oil and gas condensate field on the state of the forest-tundra territory according to Landsat satellites // Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2009. № 4. P. 78–87 (in Russian).
37. Tsydypov B.Z., Mironov I.A., Kulikov A.I. Identification of desert areas based on a comprehensive analysis of multispectral (Landsat) and radar (SRTM) satellite data // Vestnik IrGTU. 2012. № 4. P. 67–73 (in Russian).
38. Povkh V. I., Garbuzov G.P., Shlyakhova L.A. Space monitoring of agricultural lands of the Rostov region // Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2006. № 3. P. 89–96 (in Russian).
39. Martynyuk V.A. Monitoring of lake-marsh systems areas of the region based on remote sensing data of the Earth // Environmental monitoring: sb. materialov II mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Brest: BrGU, 2013. P. 118–121 (in Russian).
40. Bartalev S.A., Belyayev A.I., Egorov V.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Korshunov N.A., Kotelnikov R.V., Lupyan E.A. Validation of the results of detection and assessment of areas damaged by forest fires from satellite monitoring data // Modern problems of remote sensing of the Earth from space: Physical fundamentals, methods and technologies of monitoring the environment, potentially dangerous objects and phenomena. Collection of scientific articles. M.: GRANP polygraph, 2005. V. 2. P. 343–353 (in Russian).
41. Bartalev S.A., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Panova O.Yu., Efremov V.Yu. Express mapping of damages of Russian forests by fires on Landsat satellite data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2014. V. 11. № 1. P. 9–20 (in Russian).
42. Loupian E.A., Mazurov A.A., Flitman E.V., Ershov D.V., Korovin G.N., Novik V.P., Abushenko N.A., Altyntsev D.A., Koshelev V.V., Tashchilin S.A., Tatarnikov A.V., Csiszar I., Sukhinin A.I., Ponomarev E.I., Afonin S.V., Belov V.V., Matvienko G.G., Loboda T.V. Satellite monitoring of forest fires in Russia at federal and regional levels // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. № 11. P. 113–145.
43. Sidorenkov V.M., Doroshchenkova E.V., Zhafyarov A.V., Ilin F.S. Assessment of the potential of different types of felling based on the analysis of Landsat 8 satellite data // Lesotekhnicheskyy zhurnal. 2015. V. 5. № 1 (17). P. 97–109 (in Russian).

44. Tikhomirov O.A., Bocharov A.V., Komissarov A.B., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. Use of Landsat 8 OLI sensor data to estimate turbidity, chromaticity and chlorophyll content in the water of the Ivankovskoye reservoir // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. 2016. № 2. P. 230–244 (in Russian).
45. Sborishuk Yu.N. Remote methods of inventory and monitoring of soil cover. M.: Izd-vo MGU, 1992. Part 1. 86 p. (in Russian).
46. Terekhov A.G., Pak I.T., Dolgikh S.A. Data of Landsat-5, 7, 8 and WVH in the task of monitoring the hydrological regime of the Kapshagay reservoir on the Tekes river (the Chinese part of the Ile river basin) // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. № 6. P. 174–182 (in Russian).
47. Silkin K.Yu. Method for assessing the ecological state of the Voronezh reservoir based on materials of multi-zone remote sensing // Vestnik VGU. Seriya: Geologiya. 2012. № 1. P. 220–223 (in Russian).
48. Laverov N.P., Popovich V.V., Vedeshin L.A., Galyano F.R. Methods for analyzing remote sensing data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. V. 12. № 6. P. 145–153 (in Russian).
49. Li S., Chen X. A new bare-soil index for rapid mapping developing areas using Landsat 8 data // The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: ISPRS technical commission IV symposium. V. XL-4. Suzhou, China. 2014. P. 139–144.
50. Gornyy V.I. Satellite measuring methods of infrared thermal range in monitoring potentially dangerous phenomena and objects // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2004. V. 2. № 1. P. 10–16 (in Russian).
51. Kuular Kh.B. Evaluation of the Uyuck mountain ridge on the basis of Landsat data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. V. 10. № 4. P. 239–244 (in Russian).
52. Zhilenev M.Yu. Overview of the application of multispectral remote sensing data and their combinations in digital processing // Geomatika. 2009. № 3. P. 56–64 (in Russian).
53. Evdokimov S.I., Mikhlap S.G. Determining the physical meaning of the Landsat image channels combination for monitoring the state of terrestrial and aquatic ecosystems // Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Estestvennyye i fiziko-matematicheskiye nauki”. 2015. № 7. P. 21–32 (in Russian).
54. Knizhnikov Yu.F. Aerospace methods of geographical research. M.: Izd-vo “Akademiya”. 2004. 336 p. (in Russian).
55. Terekhin E.A. Empirical assessment and mapping of the biometric characteristics of forest plantations based on the Landsat TM satellite imagery // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 1. P. 122–130 (in Russian).
56. Sochilova E.N., Ershov D.V. Analysis of the possibility of determining the stocks of tree species according to Landsat ETM data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. № 3. P. 277–282 (in Russian).
57. Smyshlyakov S.G. Features of interpretation of landscapes on multispectral space images for creating a map of the elements of habitat of hunting resources // Geomatika. Moskva: Sovzond. 2013. № 1. P. 53–62 (in Russian).
58. Quinn W.J. Band combination [Internet resource]: <http://web.pdx.edu/~emch/ip1/bandcombinations.html> (Date of the application 08.06.2017).