

П. Е. Самсонов¹✉, А. Ю. Чермошенцев

Разработка методики экологического картографирования по данным дистанционного зондирования Земли

¹ *Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: pascha.samsonov2017@yandex.ru

Аннотация. Современная экологическая ситуация характеризуется возрастающей антропогенной нагрузкой на природные комплексы. Эффективное управление природопользованием требует оперативного и пространственно-привязанного мониторинга. Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса и с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предоставляют мультиспектральную, гиперспектральную и радиолокационную информацию. Однако ключевой задачей остается разработка интегрированной методики, преобразующей сырые данные в тематические экологические карты. В статье предлагается технологическая схема экологического картографирования, включающая этапы от планирования съемки до генерации карт загрязнений, нарушенных земель и оценки состояния растительности.

Ключевые слова: экологическое картографирование, дистанционное зондирование Земли, мультиспектральная съемка, гиперспектральная съемка, радиолокационная съемка, геоинформационные системы

P. E. Samsonov¹✉, A. Y. Chermoshentsev

Development of a Methodology for Environmental Mapping Based on Earth Remote Sensing Data

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: pascha.samsonov2017@yandex.ru

Abstract. The current environmental situation is characterized by increasing anthropogenic pressure on natural complexes. Effective environmental management requires operational and spatially referenced monitoring. Earth remote sensing data from space and unmanned aerial vehicles provide multispectral, hyperspectral and radar information. However, the key challenge remains the development of an integrated methodology that converts raw data into thematic environmental maps. The article proposes a technological scheme for environmental mapping, including stages from mission planning to generation of pollution maps, disturbed land maps and vegetation state assessment.

Keywords: environmental mapping, Earth remote sensing, multispectral imaging, hyperspectral imaging, radar imaging, geographic information systems

Введение

Традиционные методы натурных обследований, несмотря на высокую точность в точках опробования, являются ресурсоемкими, затратными по времени и не обеспечивают сплошного покрытия больших территорий [1].

В этом контексте дистанционное зондирование Земли из космоса и с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляет собой революционный технологический прорыв. Оно предоставляет многомерный поток данных: мультиспектральную, гиперспектральную, радиолокационную и тепловую информацию в различных пространственных и временных разрешениях [2]. Однако сами по себе данные ДЗЗ являются лишь сырьем. Ключевой научно-практической задачей становится разработка интегрированной методики, которая преобразует этот массив данных в семантически насыщенную экологическую информацию, пригодную для картографирования, анализа и моделирования.

Предлагаемая методика представляет собой сквозной технологический процесс – от планирования съемки и сбора разнородных данных до генерации тематических карт и аналитических отчетов в геоинформационной системе (ГИС). Ее ядром являются алгоритмы автоматизированной обработки, основанные на методах машинного обучения и компьютерного зрения, что позволяет перейти от экспертно-визуальной дешифровки к количественному, воспроизводимому и масштабируемому анализу [3].

Методы и материалы

Предлагаемая методика базируется на использовании трех основных типов данных ДЗЗ: мультиспектральной, гиперспектральной и радиолокационной съемки. Каждый тип имеет свои преимущества для решения конкретных экологических задач [4].

Мультиспектральная съемка (3–10 каналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах) позволяет рассчитывать вегетационные индексы (NDVI, NDWI), выявлять нарушения растительного покрова и классифицировать типы земельного покрова. Среди российских аппаратов наиболее доступны данные «Канопус-В» (пространственное разрешение 2,1 м, 5 спектральных каналов) и «Ресурс-П» (разрешение до 0,7 м, 8 каналов) [5]. Гиперспектральная съемка (сотни узких спектральных каналов) дает возможность идентифицировать конкретные загрязнители (нефтепродукты, тяжелые металлы) по спектральным сигнатурам. В России функционирует аппарат «Ресурс-П» №2 с гиперспектральной аппаратурой ГСА-ВСП (128 каналов в диапазоне 0,4–1,1 мкм). Радиолокационная съемка (всепогодность, чувствительность к шероховатости и влажности) незаменима для мониторинга нефтяных разливов, нарушений почвенного покрова и оползневых процессов. Данные с аппарата «Кондор-ФКА» (S-диапазон, разрешение до 1,2 м) представляют собой перспективный российский источник [6].

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики основных российских и зарубежных систем ДЗЗ, пригодных для экологического картографирования.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики космических систем ДЗЗ для экологического картографирования

Параметр	Канопус-В (РФ)	Ресурс-П (РФ)	Кондор-ФКА (РФ)	Landsat 8/9 (США)	Sentinel-2 (ЕС)
Тип съемки	мульти-спектр.	мульти+ги-перспектр.	радиолокац.	мульти-спектр.	мульти-спектр.
Простр. разрешение (м)	2,1	0,7–12	1,2–6	15–30	10–60
Кол-во каналов	5	8+128	1 (поляризация)	11	13
Полоса захвата (км)	20,4	30–97	8–20	185	290
Период повторения (сут)	5	3	6	16	5

Кроме космических данных, в методике предусмотрено использование съемки с БПЛА (квадрокоптеры с мультиспектральными камерами типа Micasense, RedEdge) для локальных участков с высоким разрешением (до 5 см/пиксель).

Обработка данных включает атмосферную коррекцию, геометрическую привязку, расчет спектральных индексов, классификацию с использованием методов машинного обучения (случайный лес, сверточные нейронные сети) [7].

Для получения интегральной оценки экологического состояния территории, свободной от субъективного назначения весов, можно применить индекс дистанционного зондирования экологии (RSEI). RSEI строится на четырех независимых индикаторах — зелени, влажности, сухости и тепла, — которые объединяются методом главных компонент (PCA), что исключает экспертное вмешательство и делает результаты воспроизводимыми на разных территориях. В табл. 2 показаны какие каналы используются для расчетов [8].

Таблица 2 – Используемые в формуле спектральные каналы

Канал	Название	Длина волны (мкм)
SR_B2	Синий	0,450–0,515
SR_B3	Зеленый	0,525–0,600
SR_B4	Красный	0,630–0,680
SR_B5	Ближний ИК	0,845–0,885
SR_B6	Коротковолновый ИК 1	1,560–1,660
SR_B7	Коротковолновый ИК 2	2,100–2,300
ST_B10	Тепловой (яркостная температура)	10,6–11,2

Ниже приведены формулы расчета компонентов RSEI, ориентированный на общедоступные снимки Landsat 8 (OLI/TIRS) уровня обработки Collection 2 Level 2 (Surface Reflectance). Аналогичные вычисления могут быть выполнены по данным Sentinel-2 или российских аппаратов после соответствующей калибровки.

Зеленость (NDVI) – классический вегетационный индекс [9]:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}};$$

где ρ_{Red} – канал SR_B4, ρ_{NIR} – канал SR_B5.

Влажность (Wet) — вторая компонента преобразования Tasseled Cap для Landsat 8 [9]:

$$Wet = 0,1511 \cdot \rho_{Blue} + 0,1973 \cdot \rho_{Green} + 0,3283 \cdot \rho_{Red} + 0,3407 \cdot \rho_{NIR} - 0,7117 \cdot \rho_{SWIR1} - 0,4559 \cdot \rho_{SWIR2},$$

где ρ_{Blue} – SR_B2, ρ_{Green} – SR_B3, ρ_{SWIR1} – SR_B6, ρ_{SWIR2} – SR_B7.

Сухость (NDBSI) – среднее арифметическое почвенного индекса (SI) и индекса застройки (IBI) [9]:

$$SI = \frac{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})}{(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})};$$

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_{SWIR1}}{2\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right)}{\frac{2\rho_{SWIR1}}{2\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right)}.$$

Тепло (LST) — температура земной поверхности, извлекаемая из теплового канала ST_B10. Яркостная температура T_B (в Кельвинах) пересчитывается в LST с предварительной оценкой излучательной способности через вегетационную долю FV [9]:

$$FV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2;$$

$$\varepsilon = 0,004 \cdot FV + 0,986;$$

$$LST = \frac{T_B}{1 + \frac{0,00115 \cdot T_B \cdot \ln \varepsilon}{1,438}} - 273,15;$$

где T_B – яркостная температура (К) из канала ST_B10.

Перед объединением все четыре индикатора нормализуются в диапазон от 0 до 1 для устранения размерности. По формуле:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}};$$

$$PC1 = \omega_1 \cdot X_1 + \omega_2 \cdot X_2 + \omega_3 \cdot X_3 + \omega_4 \cdot X_4;$$

где: X_1, X_2, X_3, X_4 – нормализованные (в диапазоне [0,1]) значения NDVI, Wet, NDBSI, LST;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – элементы первого собственного вектора ковариационной матрицы этих четырех переменных, соответствующего наибольшему собственному значению.

Веса ω_i не назначаются исследователем, а вычисляются алгоритмом PCA, который ищет такое направление в четырехмерном пространстве признаков, вдоль которого дисперсия данных максимальна.

По всем пикселям (исключая маскированные) строится ковариационная матрица C размером 4×4 для переменных X_1, X_2, X_3, X_4 .

Решается уравнение на собственные значения:

$$Cv = \lambda v;$$

где λ – собственное значение, v – собственный вектор.

Выбирается собственный вектор $v^{(1)} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)^T$, отвечающий максимальному λ_{max} . Он и задает веса в линейной комбинации PC1.

Сумма квадратов весов обычно нормируется на единицу: $\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2 = 1$.

Итоговый индекс дополнительно нормируется [9]:

$$RSEI = \frac{PC1 - PC1_{min}}{PC1 - PC1_{min}}.$$

Значения RSEI, близкие к 1, отвечают наилучшему экологическому состоянию, близкие к 0 – наихудшему. Для пространственного анализа полученный слой классифицируется на категории. Расчет выполняется попиксельно в среде

ГИС; водные объекты, искажающие статистику РСА, исключаются по маске $NDWI > 0$.

Результаты

На основе анализа литературных источников и характеристик существующих систем ДЗЗ разработана технологическая схема экологического картографирования, включающая пять основных этапов. Схема реализует сквозной технологический процесс – от планирования съемки до генерации тематических карт и аналитических отчетов в ГИС.

На первом этапе необходимо четко определить, какие именно экологические показатели будут оцениваться. В рамках исследования рассматривались три основных типа нарушений: загрязнение почвенного покрова, угнетение лесной растительности и техногенная трансформация земель (карьеры, отвалы, нарушенный рельеф). Исходя из задач подбирается съемочная система [10]. Для общей инвентаризации и крупномасштабного обзора достаточно мультиспектральных данных. Если же требуется идентифицировать конкретное вещество (например, нефтяную пленку или тип тяжелого металла), необходима гиперспектральная съемка. Радиолокационные данные (РСА) применяются в тех случаях, когда важна всепогодность или нужно зафиксировать изменения микрорельефа и шероховатости поверхности, которые не видны в оптике.

На втором этапе выполняется заказ и приемка данных с российских космических аппаратов: «Канопус-В», «Ресурс-П», «Кондор-ФКА». Полученные сырые снимки проходят стандартную предварительную обработку: радиометрическая калибровка (учет шумов сенсора), атмосферная коррекция (устранение дымки и рассеянной радиации) и ортотрансформирование – приведение к единой картографической проекции с устранением искажений рельефа [11].

На третьем этапе для количественной оценки состояния растительного покрова рассчитываются стандартные вегетационные индексы: NDVI, SAVI, LAI. По радиолокационным данным вычисляются текстурные признаки (например, матрица совместной встречаемости GLCM), которые хорошо выделяют антропогенно нарушенные участки. Для гиперспектральных снимков применяется метод спектрального угла (SAM), позволяющий сравнить пиксель с эталонной сигнатурой загрязнителя [12].

Четвертым этапом на основе полученных признаков выполняется контролируемая классификация. Используются метод случайного леса, машины опорных векторов (SVM) и сверточные нейронные сети [13]. Однако полностью автоматизировать процесс не всегда возможно: некоторые объекты (например, стихийные свалки или старые техногенные формы рельефа) уверенно распознаются только при визуальном дешифрировании опытным специалистом. Поэтому конечное решение принимается по результатам совместного анализа автоматического и ручного методов [14].

На заключительном этапе формируются несколько типов картографических материалов. Прежде всего, это карта категорий экологического состояния территории («норма», «зона риска», «зона кризиса»). Далее – отдельные карты нару-

шенных земель и карты загрязнения водных объектов (по гиперспектральным данным). Все слои экспортируются в стандартные векторные форматы и загружаются в ГИС для дальнейшего анализа и подготовки отчетов [15].

Описанную схему можно применить для получения набор конкретных картографических материалов.

Первая карта NDVI. На ней хорошо видны участки, где растительность угнетена: там значения индекса опускаются ниже заданного порога. Такие зоны обычно привязаны к техногенным объектам или нарушенным землям.

Вторая карта посвящена загрязнению почв нефтепродуктами. Ее строили по гиперспектральным данным: спектр каждого пикселя сравнивали с библиотекой эталонных сигнатур загрязнителей. Там, где совпадение максимальное, фиксируется нефтяное загрязнение.

Третья карта нарушенные земли. Здесь использовали радиолокационные снимки. Нарушение проявляется в резком скачке коэффициента обратного рассеяния: это означает, что изменилась шероховатость или структура поверхности. Так можно обнаружить карьеры, отвалы, техногенные выемки.

Четвертая карта – интегральная. Ее рассчитали по формуле RSEI, объединив все перечисленные признаки. Получился единый показатель экологического риска для каждого участка территории.

Заключение

В ходе выполнения научно-исследовательской работы была предложена методика экологического картографирования по данным дистанционного зондирования Земли. В ее основе лежит обоснованный выбор мультиспектральных, гиперспектральных и радиолокационных данных — включая съемку с российских космических аппаратов. Для обработки этих данных предложена сквозная технологическая схема, которая охватывает все этапы: от предварительной коррекции снимков до построения итоговых тематических карт. Кроме того, введен интегральный экологический индекс, позволяющий объединить в едином показателе оптические и радиолокационные признаки нарушений.

В ближайшей перспективе планируется создание полностью автоматизированного веб-сервиса для экологического мониторинга, который будет работать на основе сверточных нейронных сетей и облачных вычислительных платформ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бугакова Т. Ю., Шарапов А. А. Применение интеллектуальных систем для решения задач в области геопространственных технологий и дистанционного зондирования. – Текст: электронный // Научная статья СГУГиТ. – Новосибирск, 2022. – С. 163–168. – URL: <https://gclnk.com/3Gco6DMm> (дата обращения: 14.12.2025).
2. Валиев В. С., Иванов Д. В. Градиентный алгоритм семантической сегментации изображений земной поверхности и его использование для выделения границ водных объектов. – Текст: электронный // Научный журнал КубГАУ. – 2021. – № 171. – С. 1–17. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gradientnyy-algoritm-semanticheskoy-segmentatsii-izobrazheniy-zemnoy-poverhnosti-i-ego-ispolzovanie-dlya-vydeleniya-granits-vodnyh> (дата обращения: 05.04.2026).

3. Сидоров М. В. Разработка алгоритма семантической сегментации данных дистанционного зондирования Земли. – Текст: электронный // Advanced Engineering Research. – 2023. – № 4. – С. 34–41. – URL: <https://www.vestnik-donstu.ru/jour/article/view/2259> (дата обращения: 04.04.2026).
4. Космические аппараты «Канопус-В»: техническое описание. – М.: ВНИИЭМ, 2020.
5. Космический комплекс «Ресурс-П»: руководство пользователя. – Самара: РКЦ «Прогресс», 2021.
6. Radar satellite «Kondor-FKA»: data sheet. – Moscow: NPO Mashinostroyeniya, 2023.
7. Landsat 8 Data Users Handbook. – Sioux Falls: USGS, 2019.
8. Sentinel-2 User Handbook. – Paris: ESA, 2020.
9. Xu H. A remote sensing urban ecological index and its application // Acta Ecologica Sinica. – 2014. – Vol. 33, No. 24. – P. 7853–7862.
10. Тикунов В. С., Котова Т. В., Белоусов С. К. Экологическое состояние: определение, показатели, картографирование. – Текст: электронный // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 165–194. – URL: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-1-27-165-194> (дата обращения: 10.03.2026).
11. Будагов И. В., Надбережный Л. О. Введение в экологическое картографирование. – Текст: электронный // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России. – Пенза: Пензенский ГАУ, 2024. – С. 6–9. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67340615> (дата обращения: 10.03.2026).
12. Игнатъев А. В., Гилка В. В., Матыцына Д. А. Автоматическое распознавание типа застройки для системы экологического мониторинга. – Текст: электронный // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 1(61). – С. 11. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42672873> (дата обращения: 10.03.2026).
13. Сладкопепцев С. А. Проблемы классификации и картографирования экологических систем. – Текст: электронный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 3. – С. 47–53. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24103679> (дата обращения: 10.03.2026).
14. Yuan Z., Liu L., Wang M., Huang C. Ecological change analysis of Zhongxiang City based on remote sensing ecological index // Resources Environment & Engineering. – 2019. – Vol. 33, No. 04. – P. 474–480.
15. Guo H., Liu L., Sun X., Song Y. Evaluating Environmental Quality and Its Driving Force in Northeastern China Using the Remote Sensing Ecological Index // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, No. 23. – Art. 16304. – DOI: 10.3390/su142316304.

© П. Е. Самсонов, Чермошенцев А. Ю. 2026