Обзорная статья
УДК 502.175:528.8
https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-34-47
https://elibrary.ru/qgwwix

Оценка техногенного воздействия добычи нефти и газа на природную среду по данным ДЗЗ: обзор исследований

Роман Эдуардович Иванов✉
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
✉ rivanov044@gmail.com

Аннотация. Настоящая работа представляет собой обзор методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для оценки и мониторинга техногенного воздействия добычи нефти и газа на природную среду. Подробно рассмотрены спектральные и радиолокационные критерии дешифрирования основных видов геохимических и физических нагрузок: битумизация (нефтяные загрязнения), галогенез (засоление), механогенез (механическое нарушение ландшафтов) и атмосферное загрязнение. Показано, что для выявления нефтяных загрязнений почв наиболее информативен индекс NDVI, где значения от -0,25 до 0,15 достоверно указывают на наличие нефтяных пленок; на водных объектах нефтяные «слики» детектируются по радиолокационным снимкам Sentinel-1 в поляризации VV, как зоны пониженного обратного рассеяния. Для идентификации техногенного галогенеза (засоления) применяется индекс NDSI: значения <0,02 соответствуют фоновым почвам, 0,08-0,15 – среднезасоленным, а >0,25 – солончакам с мощной солевой коркой. Оценка механогенеза базируется на индексах SAVI (деградированные почвы: от -0,1 до 0,1), NDVI (отсутствие растительности: 0,133-0,166), NDBI (степень запечатывания почв инфраструктурой) и BSI (выделение обнаженных грунтов). Мониторинг атмосферного загрязнения включает выявление шлейфов метана по мультиспектральным данным Sentinel-2 (SWIR-каналы) и фиксацию осаждения сажи на снежном покрове в зимний период.

Ключевые слова: механогенез, битумизация, галогенез, вегетационный индекс, Sentinel, Landsat, экологический мониторинг

Для цитирования: Иванов Р.Э. Оценка техногенного воздействия нефтегазовой отрасли на природную среду по данным ДЗЗ // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2026. Т. 12. № 2. С. 34-47. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-34-47. EDN QGWWIX.

Section 1. POLLUTION

Review Paper

Assessment of the anthropogenic impact of the oil and gas industry on the natural environment based on remote sensing data

Roman E. Ivanov✉
Perm State University, Perm, Russia
✉ rivanov044@gmail.com

Abstract. This review examines Earth remote sensing methods for assessing and monitoring the anthropogenic impact of oil and gas extraction on the natural environment. It details the spectral and radar interpretation criteria for identifying key types of geochemical and physical stressors: bitumenization (oil contamination), halogenesis (salinization), mechanogenesis (mechanical landscape disturbance), and atmospheric pollution. The study demonstrates that the NDVI index is the most informative tool for detecting oil contamination in soils, with values between -0.25 and 0.15 reliably indicating the presence of oil films; in water bodies, oil slicks are detected via Sentinel-1 radar imagery (VV polarization) as zones of reduced backscatter. The NDSI index is used to identify anthropogenic halogenesis (salinization): values <0.02 correspond to background soils, 0.08-0.15 to moderately saline soils, and >0.25 to salt flats with thick salt crusts. Assessment of mechanogenesis relies on the SAVI index (degraded soils: -0.1 to 0.1), NDVI (absence of vegetation: 0.133-0.166), NDBI (degree of soil sealing by infrastructure), and BSI (identification of exposed soil). Monitoring of atmospheric pollution involves detecting methane plumes using Sentinel-2 multispectral data (SWIR channels) and tracking soot deposition on snow cover during the winter season.

Key words: mechanogenesis, bituminization, halogenesis, vegetation index, Sentinel, Landsat, environmental monitoring

For citation: Ivanov R.E. Assessment of the anthropogenic impact of the oil and gas industry on the natural environment based on remote sensing data. *Anthropogenic Ttransformation of Nature*. 2026. Vol. 12. Iss. 2. P. 34-47. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2026-2-34-47. EDN QGWWIX. (in Russian)

© Иванов Р.Э., 2026

Введение

В наше время ведется активная добыча нефти и газа, которая играет важную роль в энергетике. Но добыча нефти сопровождается загрязнением экосистем, что являлось и до сих пор является одной из главных экологических проблем. На каждом этапе производства нефтепродуктов, происходят утечки и разливы, связанные с авариями или нарушениями эксплуатации, что приводит к геохимическим (галогенез, битумизация, атмосферное загрязнение) и физическим (механогенез) нагрузкам на природную среду (Бузмаков и др., 2021). К основным источникам загрязнения относятся нефтесодержащие породы, минерализованные пластовые воды, буровые растворы, химические реагенты и кислоты, горюче-смазочные материалы. Кроме того, с выходом высокоминерализованных пластовых вод в природную среду попадают тяжелые металлы такие, как Cd, Cu, Hg, Mo, Pb, Sb, Zn (Чайкин и др., 2025). Глубина проникновения загрязняющих веществ зависит от нескольких факторов: механического состава почв, степени нарушенности, вида загрязняющего вещества и объема выброса, уровня грунтовых вод, рельефа местности и др.

При полноценном мониторинге загрязнения нефтесодержащими продуктами необходимо использовать системный мониторинг (подземный, наземный и дистанционный). Основным способом получения информации, является дистанционный метод диагностики при помощи мультиспектральных и радиолокационных снимков, а подземные и наземные исследования служат для отбора проб и уточнения информации, полученной дистанционно (Остах и др., 2020).

Цель данной работы – проанализировать современные подходы к применению данных дистанционного зондирования Земли (на примере спутниковых группировок Landsat, Sentinel, SPOT, NOAA) для выявления и оценки последствий пяти основных видов техногенного воздействия нефтегазовой отрасли: битумизации, галогенеза, механогенеза, загрязнения атмосферы и газогеохимических аномалий.

Выявление участков нефтепромыслового воздействия по спектральным характеристикам и радиолокационным данным

Нефтяные загрязнения (битумизация)

Одним из основных видов геохимического воздействия на объектах нефтедобычи, является битумизация. Битумизация – это процесс загрязнения почвенного покрова, грунтов, воды и донных осадков углеводородами (Бузмаков и др., 2021).

Выявление новых участков, загрязненные нефтью и продуктами нефтедобывающей промышленности с течением времени, можно проводить при помощи синтеза разновременных мультиспектральных и гиперспектральных снимков (Антонец, 2021). С увеличением содержания нефти и нефтепродуктов в почве спектральная кривая отражения отклоняется от фоновой (чистой) почвы: отражательная способность падает по мере роста уровня загрязнения. При высоких концентрациях загрязнителя кривые спектрального отражения выравниваются и становятся почти горизонтальными во всём диапазоне длин волн (Разакова, 2017).

Для дешифрирования нефтяных пятен на основе снимков Landsat используется комбинация каналов в естественных цветах (RGB): для Landsat-5 и Landsat-7 – 3-2-1, для Landsat-8 – 4-3-2. Но при дешифрировании мелких пятен возникают трудности, в таких случаях применяются инфракрасные диапазоны, так как нефтяные разливы хорошо отслеживаются в ближнем и среднем ИК диапазонах. Связано это с тем, что нефть, как и вода поглощает большую часть излучений в данных спектральных диапазонах. Например, в комбинации каналов SWIR–NIR–Red нефтяные пятна имеют темно-синие или фиолетовые оттенки[1]. При использовании снимков Sentinel-2 для выявления утечек нефтепродуктов наилучшей комбинацией каналов является 12-7-2, в данном синтезе каналов различные антропогенные объекты отображаются в ярко-сиреневом цвете, а нефтяные разливы в красном (рис. 1 / fig. 1) (Гордиенко, 2021).

При загрязнении нефтью, происходит смена фитоценоза, которая проявляется сокращением биоразнообразия. Снижается надземная биомасса, уменьшается высота растений, снижается длина и ширина листьев, а также наблюдается замедление развития растений[2]. Поэтому для выявления загрязнений в районах нефтедобычи также используются вегетационные индексы. Для анализа состояния растительности широко используются два индекса NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс) и SAVI (почвенно-скорректированный индекс растительности) (Кожанов, Кулик, 2021). Данные индексы вычисляются по следующим формулам:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

$$SAVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}\right) * (1 + L) \quad (2)$$

где NIR – ближний инфракрасный, RED – красный канал, L = [0; 1], L = 0 для наибольшего индекса облиственния, L = 1 для наименьшего, L = 0,5 оптимальное значение, L + 1 – множительный фактор, присутствующий в SAVI, приводящий к тому, что значения изменяются от -1 до 1, вводится для того, чтобы свести эти индексы к виду NDVI при L, стремящемуся к 0 (Разакова, 2017).

Вычисления данных индексов в работе М.Г. Разаковой (2017) показали, что в районе нефтедобычи почва и растительность в области нефтяных пятен имеет низкие значения индексов, а также сильно отличаются фоновые и загрязненные почвы в синтезе коротковолнового ИК и двух индексированных каналов, выполненных на основе NDVI и SAVI, связано это с тем, что нефтепродукты темнее по тону, чем почва и при попадании на нее уменьшают отражательную способность.

[1] Борисов Д.В. Дешифрирование нефтезагрязненных территорий при помощи данных дистанционного зондирования // Использование космических средств и технологий для мониторинга окружающей природной среды. 2014. С. 261-262.

[2] Титова Л.А., Дзюба Е.А. Влияние добычи нефти на природные особенности территории Пермского края // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: материалы всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка, 21-22 апреля 2022 г. / под. ред. С.А. Бузмакова. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. С. 377-380.



Рис. 1. Нефтяной разлив (выделен красным цветом) и нефтепромысловые объекты в комбинации каналов 12-7-2 Sentinel-2 (Гордиенко, 2021)
Fig. 1. Oil spill (highlighted in red) and oilfield facilities in Sentinel-2 band combination 12-7-2 (Gordienko, 2021)

В.Н. Копылов с соавторами (2009) для обнаружения разливов нефти также предлагают использовать индекс NDVI с экспериментально установленным значением индекса для разливов нефти на почве от -0,25 до 0,15 в программной среде ENVI по следующему алгоритму (рис. 2 / fig. 2):

1. Рассчитать индекс NDVI для исходного космического снимка.
2. Создать маску на основе полученных значений NDVI и исключить территории, значения которых находятся вне диапазона -0,25–0,15.
3. Разделить территорию на 3 класса (нефтезагрязнения, дороги и строения, водоемы) и создать обучающие выборки для каждого класса.
4. Выполнить классификацию по алгоритмам, подобранным к пригодности для распознавания разливов нефти (минимальное расстояние, максимальное правдоподобие и спектральный угол местности).
5. Преобразовать, полученный растровый слой в векторный формат.

При использовании космических снимков высокого разрешения и правильной классификации можно добиться достоверности распознавания нефтяных пятен около 80%.

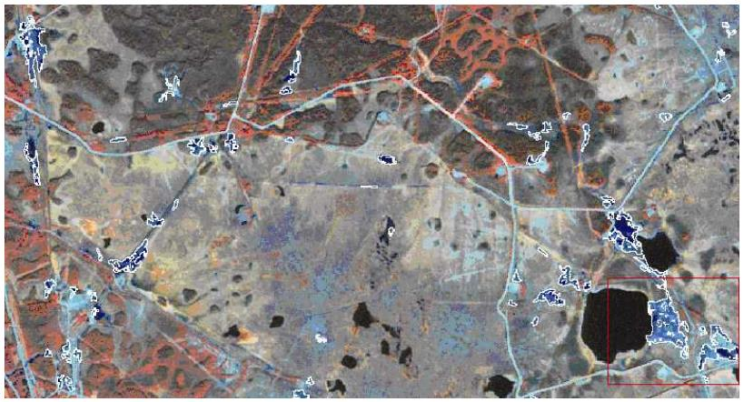


Рис. 2. Выделенные контуры разливов нефти по алгоритму В.Н. Копылова и соавторов (2009)
Fig. 2. Identified oil spill contours using the algorithm of V.N. Kopylov et al. (2009)

При обнаружении нефтяных разливов на водной поверхности основным источником данных являются радиолокационные снимки (Сагатдинова, Нурсеитов, 2024). Радиолокационная съемка – это один из видов аэрокосмической съемки при помощи активного микроволнового датчика, излучающего и принимающего обратно отраженные радиоволны. Существует несколько спутниковых группировок, проводящие радиолокационную съемку: Sentinel – 1A, B, RISAT-1, KOMPSAT-5, ALOS-2, TanDEM-X, TerraSAR-X, COSMO – SkyMed – 1, 2 ,3 ,4 и RadarSat-2 (Балдина и др., 2019). Перед началом анализа необходимо провести предварительную обработку снимков, состоящую из радиометрической коррекции, геометрической коррекции, сглаживания спекл-шума и других процедур (Бекмухамедов и др., 2016). Выявление разливов нефти на радиолокационных снимках происходит благодаря зонам «выглаживания» на водной поверхности (Сагатдинова, Нурсеитов, 2024). Нефть, попавшая на водную поверхность, выглаживает волнение, выглаженная поверхность начинает рассеивать электромагнитные волны с датчика радиолокатора, в итоге отразившиеся радиоволны не возвращаются к радиолокатору из-за чего нефтяной «слик» отображается на снимке темным пятном (Клименко и др., 2023). Для распознавания нефтяных «сликов» на поверхности воды чаще всего используют поляризацию VV, так как в данной поляризации нефтяные пленки, выглядят контрастными черными пятнами на поверхности воды серого цвета.

Так, Б.Э. Бекмухамедов с соавторами (2016) провели детектирование нефтяных загрязнений в Каспийском море. В работе была создана база данных радиолокационных данных со спутника Sentinel-1A и использовано в ПО Sentinel Toolbox, входящее в пакет SNAP (Sentinel Application Platform). В результате анализа поверхности моря на наличие «выглаживания» в поляризации VV, зафиксировано 16 нефтяных пятен со средней степенью достоверности (рис. 3 / fig. 3).

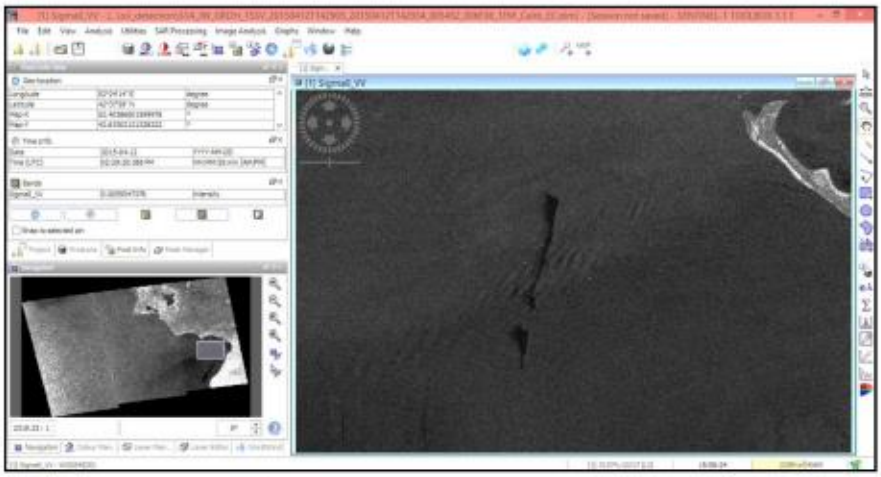


Рис. 3. Нефтяное загрязнение на радиолокационном снимке Sentinel-1A (Бекмухамедов и др., 2016)
Fig. 3. Oil pollution in a Sentinel-1A radar image (Bekmukhamedov et al., 2016)

Е.Н. Кулик и Д.А. Байкин (2022) тоже исследовали Каспийское море. В качестве данных использовались радиолокационные снимки Sentinel-1A с поляризацией VV + VH и первым уровнем обработки GRD (Ground Range Detected) в ПО SNAP. Изначально выполнена базовая радиометрическая коррекция с использованием спекл-фильтра для удаления шумов. После коррекции снимка был рассчитан индекс RVI (Radar Vegetation Index), полагая что он будет показательным, как и NDVI. Далее при помощи инструмента «Oil Spill Detection» выполнен автоматический поиск нефтяных загрязнений.

Другими исследователями (Наздрачев, Чермошенцев, 2021) предложено использование снимков Sentinel-1 и обработку в ПО SNAP для обнаружения нефтяных разливов на водной поверхности. Подходящий снимок, загружается в SNAP, выделяется область, выполняется фильтрация спекл-шума, далее применяется инструмент «Oil Spill Detection», после чего выполняется геометрическая коррекция при помощи модели эллипсоида, преобразование картографической проекции и экспорт области загрязнения.

В исследовании разлива нефти в заливе Аль-Хафджи, находящегося на границе Саудовской Аравии и Кувейта, в качестве данных были использованы радиолокационные снимки Sentinel-1A и Sentinel-1B с поляризацией VV и VH с обработкой GRD (Ground Range Detected) в ПО SNAP. Первым шагом выполнена предварительная обработка радиолокационных снимков, состоящая из геометрической обработки, удаления теплового шума, радиометрической калибровки и уменьшения спекл-шума. Далее на основе цифровой модели рельефа SRTM выполнена топографическая коррекция снимка. Поляризация VV оказалась наиболее эффективной так как нефтяная пленка сглаживает капиллярные волны на водной поверхности, что четко отображается в поляризации VV в виде темных участков (рис. 4 / fig. 4) (Chaturvedi et al., 2020).

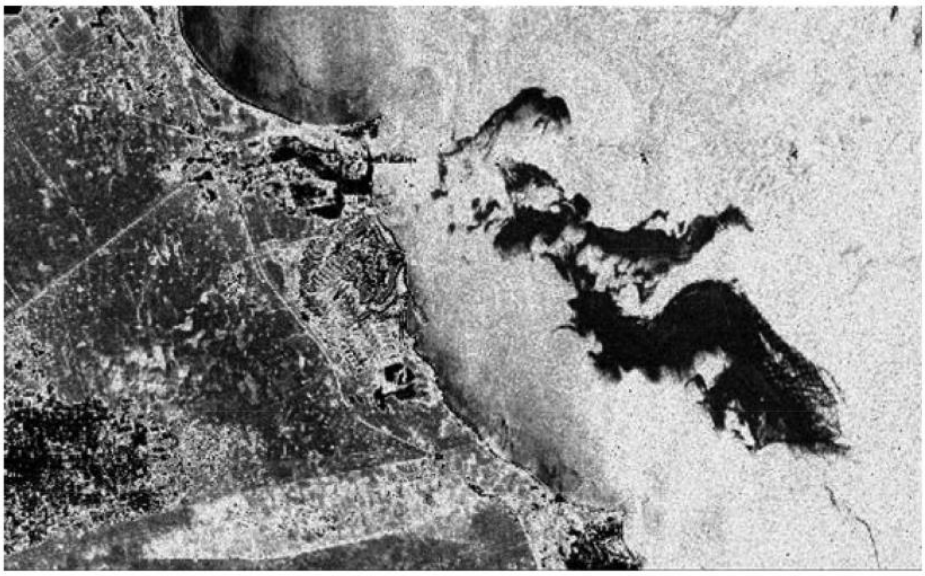


Рис. 4. Нефтяной разлив в заливе Аль-Хафджи, полученный при помощи радиолокационного снимка Sentinel-1 в поляризации VV (Chaturvedi et al., 2020)
Fig. 4. Oil spill in Al-Khafji Bay, obtained using a Sentinel-1 radar image in VV polarization (Chaturvedi et al., 2020)

Ученые из Египта исследовали распространение нефтяных загрязнений в Суэцком заливе за период 2017-2021 гг. В качестве данных также использовались радиолокационные снимки Sentinel-1 с поляризацией VV. Предварительная обработка выполнялась в программном обеспечении SNAP и включала применение точных орбитальных файлов, радиометрическую калибровку, подавление спекл-шума с использованием фильтра Ли-Сигма (окно 7×7) и конвертацию значений в децибелы. Далее на основе визуального анализа и заданных пороговых значений обратного рассеяния был выполнен поиск темных участков с дальнейшей ручной классификацией для отделения разливов нефти от схожих природных явлений (зон штиля и цветения водорослей) с использованием дополнительных данных (скорость ветра, расположение нефтедобывающей инфраструктуры). В результате было выявлено 150 загрязнений на общей площади свыше 850 км², при этом наиболее пострадавшими районами оказались участки побережья от Суэца до Рас-Гариба, а основными источниками загрязнения выступили портовые зоны и нефтедобывающие платформы (рис. 5 / fig. 5) (El-Magd et al., 2023).

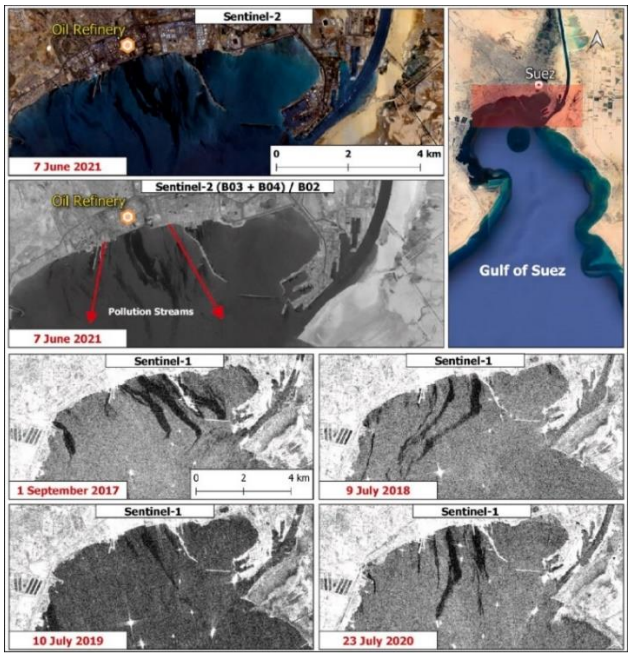


Рис. 5. Нефтяные загрязнения в Суэцком заливе, выявленные при помощи мультиспектральной и радиолокационной съемок со спутника Sentinel (El-Magd et al., 2023)
Fig. 5. Oil pollution in the Gulf of Suez detected using multispectral and radar imagery from the Sentinel satellite (El-Magd et al., 2023)

Солевые загрязнения (галогенез)

Ещё одним из наиболее характерных геохимических процессов в районах нефтедобычи, является галогенез – засоление почв, грунтов, поверхностных и подземных вод. Наиболее интенсивное воздействие на природную среду оказывают высокоминерализованные пластовые воды, состоящие из водорастворимых хлоридов и в меньшей степени – сульфатов[3] (Бузмаков и др., 2021). Причиной загрязнения природной среды высокоминерализованными водами является неисправность скважин, коррозия и прорывы водоводов высокого давления, а также дальнейший смыв с места утечки. В результате минерализованные потоки изменяют солевой состав почв, грунтов, поверхностных и грунтовых вод. При больших и постоянных утечках потоки образуют так называемые «техногенные ручьи», которые попадают в малые, а затем в крупные реки (Солнцева, 1998). Почвы, подверженные техногенному галогенезу, изменяют физическое состояние, при высыхании появляется глинистость, во влажных горизонтах становятся более вязкими, а также увеличивается их плотность. Так как загрязнение почв техногенными солями приводит к ухудшению плодородия, то происходит снижение надземной биомассы: уменьшается высота растений, длина и ширина листьев[2].

Одним из современных методов выявления галогенеза являются материалы космической съемки. Дешифрирование засоленных почв методами ДЗЗ происходи как при появлении солей на поверхности, так и по изменению отражательной способности угнетенной растительности и появлению галофитных растений. Так, Т.А. Клочко (2010) в своей работе утверждает, что засоленные почвы на космических снимках отображаются в виде пятен светло-серого и серого тона.

Солевые загрязнения, как природные, так и техногенные можно определить по спектральным характеристикам в ближнем и видимом ИК диапазонах, так как спектрально оба вида засоления проявляются в основном одинаково в виде повышения отражательной способности и скудной растительности. Для выявления засоления существует несколько подходящих спектральных индексов (Канназаров, 2026):

1. NDSI (Normalized Difference Salinity Index) – нормализованный разностный индекс засоления, рассчитываемый по формуле:

$$NDSI = \frac{RED - NIR}{RED + NIR} \quad (3)$$

2. SI (Salinity Index), имеющий несколько вариантов формул:

$$SI1 = \sqrt{(\mathrm{BLUE} \times \mathrm{RED})}; \quad (4)$$

$$SI8 = \sqrt{(\mathrm{RED} \times \mathrm{NIR})}; \quad (5)$$

$$SI12 = \frac{GREEN^2 + RED^2 + NIR^2}{2} \quad (6)$$

3. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный вегетационный индекс, используется для обнаружения угнетенной растительности из-за высокого содержания солей в почве.

З.У. Канназаров (2026) для дешифрирования засоленных почв использовал космические снимки спутников Landsat-8 (OLI/TIRS) и Sentinel-2 (MSI), а также комбинацию индексов NDSI и SI12. Для степени засоленности почв была использована таблица, представленная ниже (табл. 1 / tabl. 1).

Зарубежные авторы для выявления засоленных почв также используют космические данные со спутника Sentinel-2A и предлагают использовать индекс засоления SI и вегетационные индексы, связано это с тем, что участки поверхности, имеющие солевые загрязнения, расположены в основном на голой земле и имеют скудную растительность (Taghadosi et al., 2019).

Таблица 1

Оценка степени засоленности почв на основе индекса NDSI (Канназаров, 2026)

Table 1

Assessment of soil salinity degree based on the NDSI index (Kannazarov, 2026)

Степень засоления // Degree of salinization	*Значения NDSI // NDSI values*	*Характеристика // Characteristic*
Незасоленные // Unsalted	< 0,02	Растительность не угнетена // Vegetation is not suppressed
Слабозасоленные // Slightly saline	0,02-0,08	Незначительное угнетение // Slight suppression
Среднезасоленные // Medium saline	0,08-0,15	Пятна выцветов, угнетение растений // Spots of bleaching, plant suppression
Сильнозасоленные // Highly saline	0,15-0,25	Отсутствие растений, солевая корка // Absence of plants, salt crust
Солончаки // Solonchaks	> 0,25	Мощная солевая корка // Thick salt crust

[3] Середина В.П, Непотребный А.И., Огнев С.А. Особенности техногенного галогенеза при загрязнении нефтью почв бореального пояса // Отражение био-, гео-, антропосферных взаимодействий в почвах и почвенном покрове: сборник материалов V Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ, Томск, 7-11 сентября 2015 г. Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2015. С. 364-368.

Мохамед А.Э. Абдельрахмани и его соавторы (2022) в своей научной работе выяснили, что засоленные почвы и незасоленные в разной степени реагируют на синие и красные спектральные каналы, как по отдельности, так и вместе. Для того, чтобы исправить данную ошибку ими был разработан индекс SI_A, который учитывал данную разницу в спектральном отражении.

$$SI_A = \frac{\left(\left(\frac{BLUE \times RED}{GREEN}\right) \times \left(\frac{RED \times NIR}{GREEN}\right)\right)}{\left(\frac{BLUE - RED}{BLUE + RED}\right)} \quad (7)$$

В результате применения индекса SI_A авторам получилось выделить несколько видов почв: засоленные почвы, засоленные щелочные почвы, несоленые не щелочные почвы, переувлажненные почвы и городскую застройку (рис. 6 / fig. 6). Данный показатель имеет более высокие значения для засоленных почв и низкие для незасоленных почв.

Ученые из Гейдельбергского университета провели выявление галогенеза образованного в результате утечки нефтяного рассола на территориях нефтяного месторождения западного Техаса на основе данных Landsat ETM+. Для этого был получен космический снимок в комбинации спектральных каналов RED, GREEN, BLUE, а затем классифицирован методом контролируемой классификации на основе выборки из 12 участков в ПО ERDAS Imagine для составления карты растительного покрова засоленных и незасоленных территорий нефтяным рассолом (рис. 7 / fig. 7) (Unger et al., 2013).

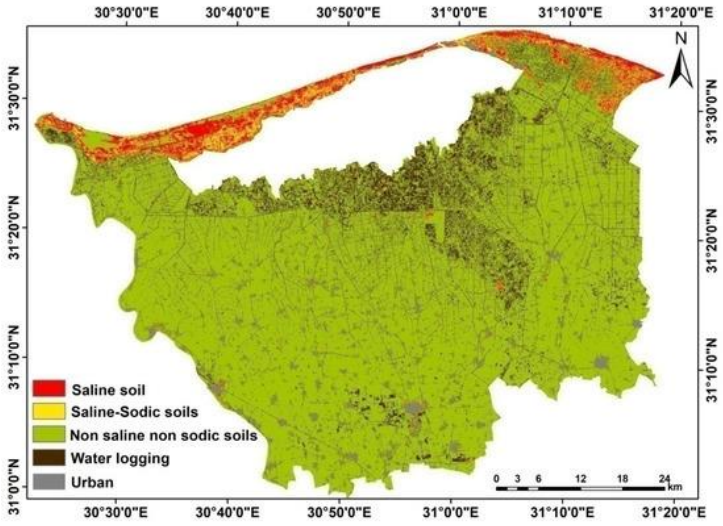


Рис. 6. Классифицированная карта типов почв по засолению, построенная на основе индекса SI_A (AbdelRahman et al., 2022)
Fig. 6. Classified map of soil types by salinity, constructed on the basis of the SI_A index (AbdelRahman et al., 2022)

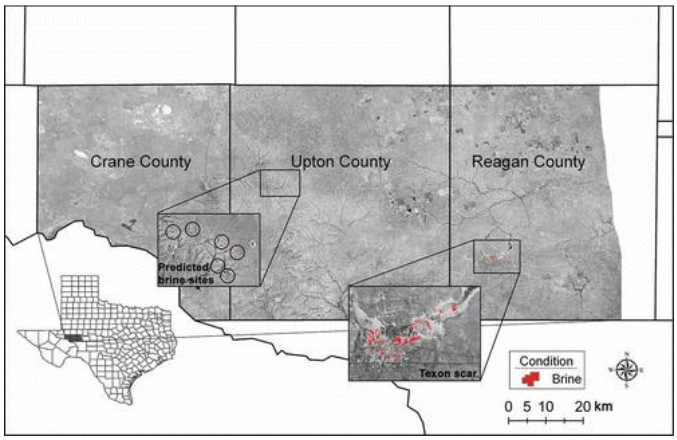
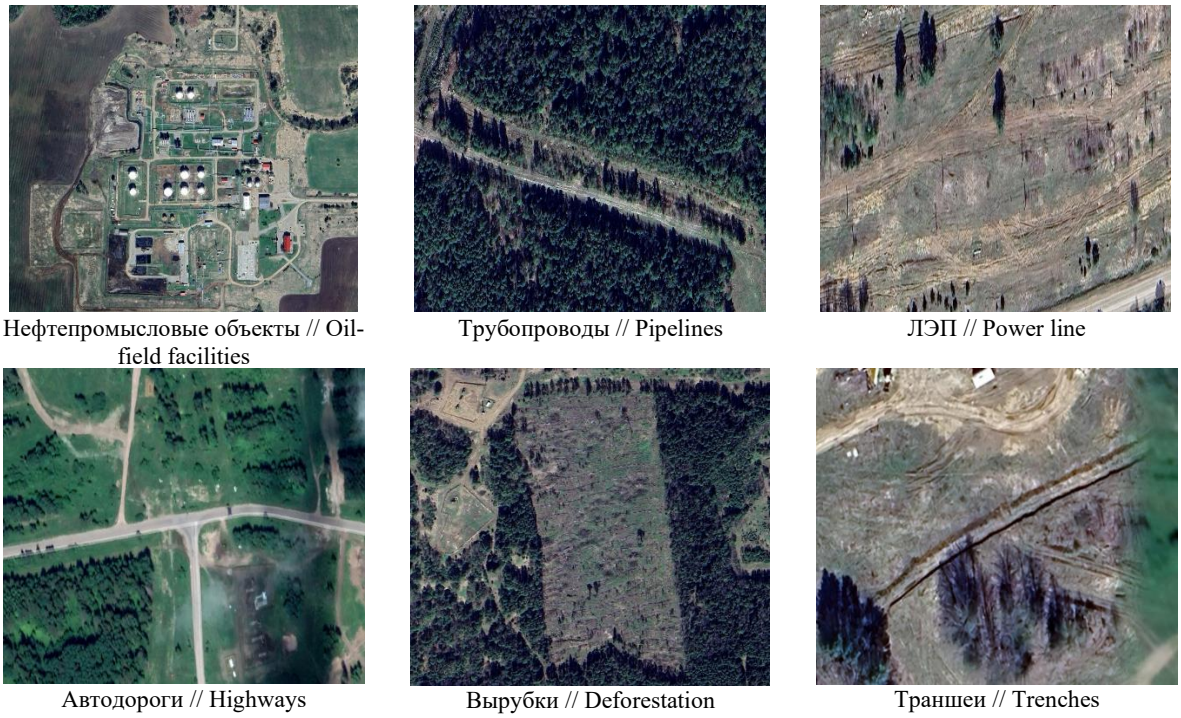


Рис. 7. Карта засоленных территорий западного Техаса (Unger et al., 2013)
Fig. 7. Map of salt-affected areas in West Texas (Unger et al., 2013)

Механогенез

Территории нефтегазовых месторождений активно развиваются, с каждым годом происходят различные изменения, что приводит природную среду к постоянным механическим воздействиям. Механические нарушения почв и грунтов называются мехоногенезом, который усиливает естественные природные процессы за счет изменения стока и сокращения ресурсов, что в свою очередь приводит к еще большей деградации почвенного покрова (Бузмаков и др., 2021). Механическая трансформация экосистем начинает проявляться уже на стадии обустройства месторождений, при прокладывании дорог, трубопроводов, обустройстве скважин и строительстве других технических объектов.

При строительстве и эксплуатации нефтегазовых месторождений появляются новые формы рельефа: положительные (валы, насыпи, отвалы) при привносе веществ и отрицательные (земляные амбары, выемки, карьеры, траншеи) при изъятии грунтов (Солнцева, 1998). Данные формы рельефа за счет изменения естественного стока воды приводят к вторичным формам рельефа (оползни, овраги, промоины). Существует несколько основных видов механогенеза на территории нефтяных месторождений: нефтепромысловые объекты, трубопроводы, линии электропередач (ЛЭП), автодороги, вырубки под новые объекты, искусственные водоемы, насыпи, траншеи (рис. 8 / fig. 8). В результате механического воздействия на почвы, происходит угнетение растительности: вырубаются деревья и кустарники, нарушается плодородный слой и происходит изменение химического состава почв (Кучин, 2025).



Нефтепромысловые объекты // Oil-field facilities | Трубопроводы // Pipelines | ЛЭП // Power line

Автодороги // Highways | Вырубки // Deforestation | Траншеи // Trenches

Рис. 8. Изображения основных объектов механогенеза на космических снимках (составлен автором)
Fig. 8. Images of the main objects of mechanogenesis in satellite images (compiled by the author)

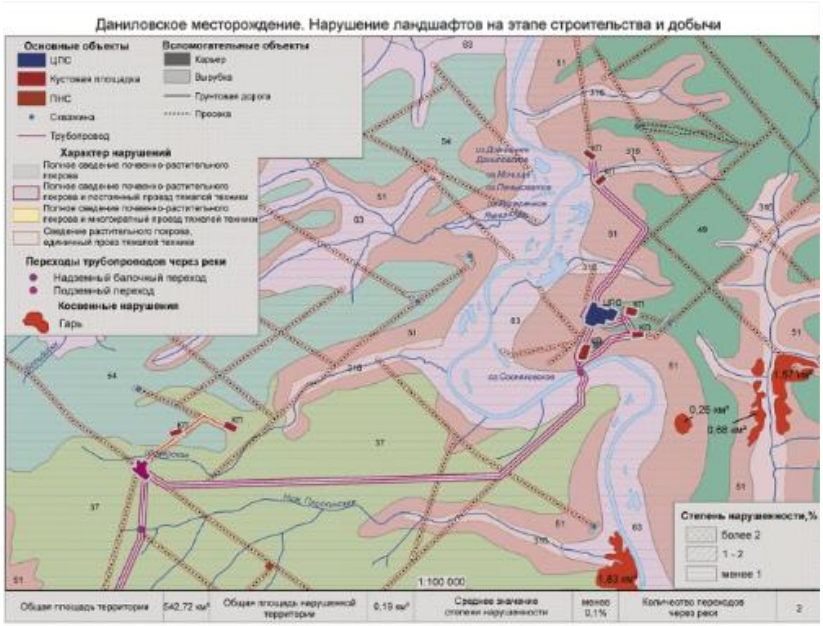


Рис. 9. Карта нарушения ландшафтов на Даниловском месторождении[4]
Fig. 9. Map of landscape disturbance at the Danilovskoye field[4]

[4] Белоусова В.Н., Каргашин П.Е. Картографирование техногенной нагрузки на территориях добычи нефти и газа в Иркутской области // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. 2017. С. 5-13.

В другом исследовании П.Е. Каргашин (2018) для дешифрирования антропогенных объектов на территории месторождения использовал снимки Landsat (рис. 10 / fig. 10) и комбинацию каналов SWIR-RED-BLUE. Для выявления объектов в данном синтезе каналов он предлагает использовать таблицу дешифровочных признаков, представленную ниже (табл. 2 / tabl. 2).

Таблица 2

Дешифровочные признаки антропогенных объектов в нефтегазовой отрасли (Каргашин, 2018)

Table 2

Decoding features of anthropogenic objects in the oil and gas industry (Kargashin, 2018)

Объект // Object	*Дешифровочные признаки / Decoding features*		
	Геометрические // Geometric	*Яркостные цвета // Bright colors*	*Структурные // Structural*
Кустовая площадка // Multiple well platform	Прямоугольник, размер небольшой // Rectangle, small size	Белый // White	Однородная текстура и структура // Uniform texture and structure
УКПГ (установка комплексной подготовки газа) // Integrated gas treatment facility (IGTF)	Многоугольник, форма сложная, по размеру больше, чем кустовая площадка // A polygon with a complex shape, larger in size than the multiple well platform.	Белый и голубой // White and blue	Неоднородная структура // Heterogeneous structure
Дорога // Road	Узкая, тонкая полоса // Narrow, thin strip	Белый // White	Почти всегда однородная текстура и структура // Almost always, the texture and structure are uniform.
Трубопровод // Pipeline	Узкая, тонкая полоса // Narrow, thin strip	Белый-голубой-желтый // White-blue-yellow	Штриховая неоднородная структура (сочетание участков разного цвета) // The штриховая heterogeneous structure (a combination of areas of different colors)



Рис. 10. Нефтепромысловые объекты в комбинации каналов SWIR-RED-BLUE (Каргашин, 2018)
Fig. 10. Oilfield facilities in the SWIR-RED-BLUE band combination (Kargashin, 2018)

Другие отечественные ученые в своей работе использовали несколько индексов для того, чтобы определить степень деградации почв на нефтяном месторождении в Республике Коми. Для оценки состояния почв был использован индекс SAVI. Так как при механическом воздействии страдает и растительный

покров, то выявление механогенеза происходило и по вегетационным индексам NDVI и SWVI (Shortwave Vegetation Index) (Гордиенко, Ткач, 2022).

$$\mathrm{SWVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{SWIR}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{SWIR}}, \quad (8)$$

где NIR – ближний инфракрасный канал, а SWIR – коротковолновый инфракрасный канал.

В результате индекса SAVI авторы получили почвы с деградацией (от -0,1 до 0,1), почвы, имеющие слабую деградацию (от 0,1 до 0,15) и здоровые почвы (более 0,2). Далее на основе SAVI была выполнена переклассификация растра и построена карта эрозии почв. По значениям индекса NDVI также получилось выделить объекты механогенеза, так как в местах нарушения почв, нарушена и растительность. Значения отсутствия растительности составили от 0,133 до 0,166, а угнетенной растительности от 0,166 до 0,2.

Нефтедобывающая промышленность является одним из основных источников механического нарушения почвенного покрова. В результате механического воздействия происходит уплотнение почв тяжелой техникой на площадках и автодорогах, в следствии чего развивается эрозия. Так в дельте Нигера, проблема механогенеза была изучена при помощи мультиспектральных индексов NDVI, NDBI, NDWI по данным спутников Sentinel-2 и MODIS. Основным индексом был NDBI (Normalized Difference Built-up Index), рассчитываемый по формуле:

$$\mathrm{NDBI} = \frac{\mathrm{SWIR} - \mathrm{NIR}}{\mathrm{SWIR} + \mathrm{NIR}} \quad (9)$$

Данный индекс отображает степень запечатывания почв, то есть создание непроницаемого покрытия в результате строительства объектов нефтедобывающей деятельности. По словам авторов в результате строительства автодорог, трубопроводов и других нефтепромысловых объектов нарушается естественный гидрологический режим, что также пагубно сказывается на природной среде (Anucha et al., 2026).

О.М. Орогбеми и С.Б. Эварегбеми (2026) для выявления деградации почв при помощи механического вмешательства, применили ещё один индекс, отличный от других, BSI (Bare Soil Index), рассчитываемый по формуле:

$$BSI = \frac{(NIR - GREEN) + RED}{(NIR + GREEN) + RED} * (-1) \quad (10)$$

Данный индекс позволяет отделить обнаженные и деградированные почвы от растительных и водных поверхностей, а также выделить антропогенно изменчивые площади: дома, дороги, стройплощадки и многое другое.

Загрязнение атмосферы

Кроме битумизации, механогенеза и галогенеза существует ещё один вид распространенного воздействия на природную среду при помощи выделения газов, называется данный процесс атмосферным загрязнением воздуха (Кучин, 2025). Основным источником выделения газов являются факельные установки, сжигающие попутный нефтяной газ. Также газ поступает в атмосферу при испарении из очистных сооружений и резервуаров, стравливании из трубопроводов и продувках добывающих скважин (Бузмаков и др., 2021). В итоге в атмосферный воздух попадает множество загрязняющих веществ: угарный газ (CO), диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), сероводород (H_2S), бенз(а)пирен ($C_{20}H_{12}$) и различные смеси углеводорода (Кучин, 2025). Загрязнение воздуха негативно сказывается на растительности, при высоких концентрациях загрязняющих веществ происходит полная деградация древостоя на больших территориях. Более чувствительными к загрязнению атмосферного воздуха являются темнохвойные породы деревьев. Сажа забивает дыхательные устьица хвоинок, что постепенно приводит к нарушению дыхательных систем и дерево погибает (Токарева, Полищук, 2009).

Загрязнение атмосферного воздуха, как и другие виды техногенной нагрузки можно определить по данным ДЗЗ. Так, вегетационный индекс NDVI и разновременные космические снимки используются для оценки изменения состояния темнохвойных лесов, так как атмосферное загрязнение сказывается на реакции деревьев (Токарева, Полищук, 2009).

При исследовании особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Ханты-Мансийского автономного округа на наличие загрязнения атмосферного воздуха, для определения состава газохимического загрязнения, используются приборы вертикального зондирования атмосферы CRIS, ATMS, OMPS спутника NOAA-20, а с использованием оптических систем обнаруживаются загрязнения сажей. В результате исследования при помощи дистанционного зондирования выделяются факельные установки и ареалы теплового и газохимического загрязнения атмосферы (Хамедов, Давыдова, 2023)

С.И. Михайлов (2009) для определения наличия загрязнения атмосферного воздуха использовал зимний космический снимок со спутника SPOT-2, так как загрязняющие вещества оседают на снежном покрове в виде черных пятен (рис. 11 / fig. 11).

В основном все отечественные и зарубежные научные деятели используют данные спутника Sentinel-5P, но Д.Ж. Варон и соавторы (2021) в своей работе продемонстрировали другой метод, отличающийся от других, основанный на мультиспектральных снимках спутника Sentinel-2 для высокочастотного мониторинга и количественной оценки аномальных точечных источников метана.

Для обнаружения шлейфов метана авторы использовали данные коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR), а именно каналы 11 и 12, и разработали три метода определения метана: однополосный многопроходный (SBMP), многополосный однопроходный (MBSP) и многополосный многопроходный (MBMP) (рис. 12 / fig. 12). Подробнее о каждом методе авторы описывают в своей статье.

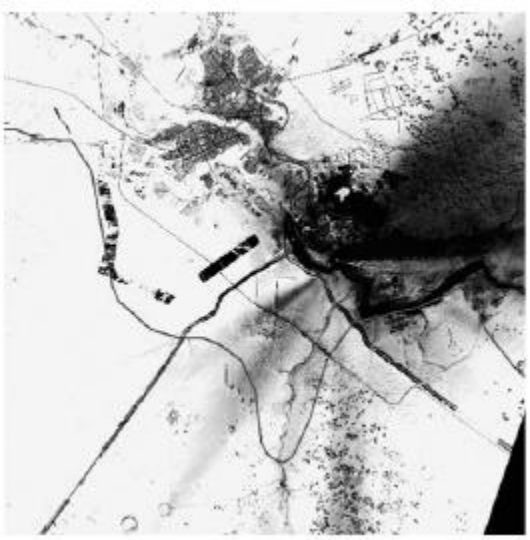


Рис. 11. Осевшие загрязняющие вещества в виде черных пятен на снежном покрове вокруг промышленного предприятия (Михайлов, 2009)
Fig. 11. Pollutants deposited as black spots on the snow cover around an industrial facility (Mikhailov, 2009)

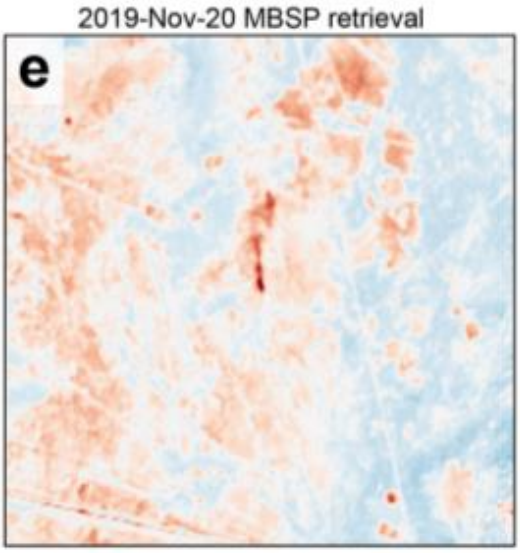


Рис. 12. Утечки метана, обнаруженные методом MBSP (Varon et al., 2021)
Fig. 12. Methane leaks detected by the MBSP method (Varon et al., 2021)

Заключение

Проведенный обзор показывает, что реакция природных экосистем на техногенное воздействие нефтегазового комплекса носит комплексный характер и затрагивает все компоненты ландшафта.

При битумизации наблюдается токсическое воздействие углеводородов на почву и растительность. Это ведет к снижению биоразнообразия, угнетению фитоценозов (уменьшению биомассы и площади листьев) и изменению спектральных характеристик почвенного покрова, что успешно выявляется методами мультиспектральной съемки.

Техногенный галогенез (засоление) вызывает стресс у растений, смену естественной растительности на галофитную и формирование солевых корок. Изменение отражательной способности поверхности и индексов засоления (NDSI, SI) позволяет дистанционно картировать очаги засоления вдоль трубопроводов.

Механогенез приводит к прямому уничтожению почвенно-растительного покрова, уплотнению грунтов тяжелой техникой и нарушению естественного гидрологического стока. Это запускает цепную реакцию вторичных деградационных процессов, таких как эрозия, образование оврагов и техногенных ручьев.

Атмосферное загрязнение (выбросы факельных установок, осаждение сажи) вызывает локальную деградацию лесов, особенно темнохвойных пород, из-за нарушения процессов фотосинтеза и дыхания. Мониторинг таких аномалий требует привлечения специализированных атмосферных сенсоров (например, TROPOMI установленный на спутник Sentinel-5P).

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) показывают себя как достаточно эффективный инструмент экологического контроля. Использование комбинаций спектральных каналов, радиолокационных данных (для дешифрирования нефтяных сликов на воде) и расчетных вегетационных индексов позволяет не

только выявлять загрязнения, но и оценивать степень деградации экосистем. Однако для уменьшения ошибок дешифрирования и точной классификации техногенных объектов методы ДЗЗ должны применяться в связке с наземными геохимическими исследованиями и интегрироваться в современные ГИС-системы для принятия управленческих решений в области природопользования и экологии.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of interest

The author declares no conflicts of interest.

Список источников

1. Антонец К.В. Комплексный мониторинг нефтегазовых загрязнений // *International agricultural journal*. 2021. № 1. С. 49-54. https://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10275

2. Балдина Е.А., Михайлюкова П.Г., Трошко К.А. Опыт использования данных радиолокационной космической съемки для создания тематических карт // *Вестник Московского университета*. 2019. Вып. 4. С.110-118.

3. Бекмухамедов Б.Э., Балакай Л.А., Каипов И.В. Мониторинг нефтяных загрязнений на акватории Каспийского моря методами дистанционного зондирования // *Гидрометеорология и экология*. 2016. № 2. С. 114-124.

4. Бузмаков С.А, Санников П.Ю., Сивков Д.Е., Дзюба Е.А., Хотяновская Ю.В., Егорова Д.О. Разработка геоинформационных систем для управления окружающей средой и экологической безопасностью в районах эксплуатируемых нефтяных месторождений // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2021. Т. 7. № 1. С. 102-127. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-102-127

5. Гордиенко А.С. Исследование возможности выявления негативного воздействия разливов нефти на окружающую растительность по данным дистанционного зондирования Земли // *Вестник СГУГиТ*. 2021. Т. 26. № 6. С. 48-55. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-48-55

6. Гордиенко А.С., Ткач А.В. Исследование состояния окружающей среды в районе нефтеразработок по космическим снимкам // *Вестник СГУГиТ*. 2022. Т. 27. № 6. С. 55-63. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-6-55-63

7. Канназаров З.У. Мониторинг засоления агроландшафтов в засушливых зонах с использованием методов дистанционного зондирования (на примере республики Каракалпакстан) // *Экономика и социум*. 2026. Т. 143. № 4. С. 705-711.

8. Каргашин П.Е. Методические аспекты дешифрирования инфраструктуры месторождений нефти и газа по снимкам высокого разрешения // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2018. Т. 24. № 2. С. 83-93. https://doi.org/10.24057/2414-9179-2018-2-24-83-93

9. Клименко С.К., Иванов А.Ю., Евтушенко Н.В. Нефтяное загрязнение оманского залива по данным радиолокационного мониторинга из космоса // *Океанические исследования*. 2023. Т. 51. № 1. С. 114-132. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).6

10. Клочко Т.А. Исследование современного состояния проблем выявления засоленных почв по данным космических съемок // *Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «География».* 2010. Т. 23. № 2. С. 156-166.

11. Кожанов К.А., Кулик Е.Н. Оценка информационной емкости данных дистанционного зондирования Sentinel-2 для мониторинга загрязнения почв нефтепродуктами в Заполярной Арктике // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021. Т. 6. С. 149-154. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-6-149-154

12. Копылов В.Н., Кочергин Г.А., Полищук Ю.М., Хамедов В.А. Использование данных ДЗЗ при решении региональных задач рационального природопользования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2009. Т. 6. № 1. С. 33-41.

13. Кулик Е.Н., Байкин Д.А. Разливы нефтепродуктов на водной поверхности: методы анализа данных дистанционного зондирования Земли при их выявлении // *Вестник СГУГиТ*. 2022. Т. 27. № 4. С. 61-73. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-4-61-73

14. Кучин Л.С. Применение дистанционного зондирования Земли для выявления последствий техногенной трансформации природной среды на месторождениях нефти и газа // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2025. Т. 11. № 1. С. 57-70. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-57-70

15. Михайлов С.И. Методика детектирования случаев загрязнения природной среды на суше по данным спутниковых наблюдений // *Проблемы анализа риска*. 2009. Т. 6. № 1. С. 32-37.

16. Мячина К.В., Малахов Д.В. Опыт применения данных дистанционного зондирования среднего пространственного разрешения для выделения объектов нефтепромыслов в условиях техногенно-модифицированного ландшафта (на примере Оренбургской области) // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2013. Т. 15. Вып. 3-7. С. 2341-2345.

17. Наздрачев П.И., Чермошенцев А.Ю. Применение методов активного дистанционного зондирования для обнаружения разливов нефти // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021. Т. 6. С. 213-218. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-6-213-218

18. Остах С.В., Бахтина Е.А., Кушеева В.С. Прогнозирующая система дистанционного мониторинга нефтезагрязненных территорий // *Информация и космос*. 2020. № 3. С. 153-163.

19. Разакова М.Г. Выявление и картирование нефтяных загрязнений почв по данным дистанционного зондирования // *Проблемы информатики*. 2017. № 4. С. 6-15.
20. Сагатдинова Г.Н., Нурсеитов Д.Б. Обработка радиолокационных данных спутника Sentinel-1 для идентификации нефтяных разливов в акватории Каспийского моря в среде GEE // *Гидрометеорология и экология*. 2024. Т. 112. № 1. С. 100-109. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-100-109
21. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 376 с.
22. Токарева О.С., Полищук Ю.М. Мониторинг состояния темнохвойных лесов в зоне загрязнения атмосферы на территории нефтедобывающих месторождений // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2009. Т. 1. Вып. 1. С. 177-181.
23. Хамедов В.А., Давыдова Н.В. Оценка вероятного газохимического загрязнения перспективных лесных особо охраняемых природных территории выбросами при сжигании попутного нефтяного газа // *Вопросы лесной науки*. 2023. Т. 6. № 1. С. 73-90. https://doi.org/10.31509/2658-607x-202261-119
24. Чайкин С.А., Бузмаков А.С., Симонов В.Э. Современное представление о техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяных месторождений и роли территорий режима особого природопользования // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2025. Т. 11. № 1. С. 71-82. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-71-82
25. AbdelRahman Mohamed. A.E., Afiff Ahmed A., D'Antonio Paola, Gabr Safwat S., Scopa Antonio. Detecting and Mapping Salt-Affected Soil with Arid Integrated Indices in Feature Space Using Multi-Temporal Landsat Imagery // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 11. https://doi.org/10.3390/rs14112599
26. Anucha J.A. Kumar S., Das B., Nkwocha I.L., Okpu A., Patidar S., Martínez-Villegas N., Gupta B.S. Multi-Index satellite-based assessment of soil surface dynamics in the Niger Delta (Nigeria) // *Frontiers in Earth Science*. 2026. Vol. 14. https://doi.org/10.3389/feart.2026.1834748
27. Chaturvedi S.K., Banerjee S., Lele S. An assessment of oil spill detection using Sentinel 1 SAR-C images // *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2020. Vol. 5. Iss. 2. P. 116-135. https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.09.004
28. El-Magd I.A., Zakzouk M., Ali E. Mapping oil pollution in the Gulf of Suez in 2017-2021 using Synthetic Aperture Radar // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2023. Vol. 26. № 3. P. 826-838. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.08.005
29. Orogbemi O.M., Ewaregbemi S.B. Development of Ilajeland Degradation System in Crude Oil Exploitation Areas Using Satellite Imagery and Support Vector Machine Model // *International Journal of research and innovation in applied science (IJRIAS)*. 2026. Vol. 11. Iss. 7. P. 1273-1283. https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2026.11070088
30. Taghadosi M.M., Hasanlou M., Eftekhari K. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery // *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52. № 1. P. 138-154. https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1571870
31. Unger D., Bowes C., Farrish K. Mapping oilfield brine-contaminated sites with mid-spatial resolution remotely sensed data // *GIScience and Remote Sensing*. 2013. Vol. 50. Iss. 6. P. 623-632. https://doi.org/10.1080/15481603.2013.850252
32. Varon D., Jervis D., McKeever J. High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. Iss. 4. P. 2771-2785. https://doi.org/10.5194/amt-14-2771-2021

References

1. Antonets K.V. Comprehensive monitoring of oil and gas pollution. *International Agricultural Journal*. 2021. Iss. 1. P. 49-54. https://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10275 (in Russian)
2. Baldina E.A., Mikhaylyukova P.G., Troshko K.A. Experience in using space-based radar imagery for creating thematic maps. *Bulletin of Moscow University*. 2019. (in Russian)
3. Bekmukhamedov B.E., Balakai L.A., Kaipov I.V. Monitoring oil pollution in the Caspian Sea using remote sensing methods. *Hydrometeorology and Ecology*. 2016. Iss. 2. P. 114-124. (in Russian)
4. Buzmakov S.A., Sannikov P.Yu., Sivkov D.E., Dzyuba E.A., Khotyanovskaya Yu.V., Egorova D.O. Development of geoinformation systems for environmental management and ecological safety in active oil field areas. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2021. Vol. 7. Iss. 1. P. 102-127. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-102-127 (in Russian)
5. Gordienko A.S. Investigating the possibility of detecting the negative impact of oil spills on surrounding vegetation using Earth remote sensing data. *Bulletin of SSUGT*. 2021. Vol. 26. Iss. 6. P. 48-55. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-48-55 (in Russian)
6. Gordienko A.S., Tkach A.V. Study of the environmental state in oil development areas using satellite imagery. *Bulletin of SSUGT*. 2022. Vol. 27. Iss. 6. P. 55-63. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-6-55-63 (in Russian)
7. Kannazarov Z.U. Monitoring of salinization in agricultural landscapes of arid zones using remote sensing methods (a case study of the Republic of Karakalpakstan). *Ekonomika and Sotsium*. 2026. Vol. 143. Iss. 4. P. 705-711. (in Russian)
8. Kargashin P.E. Methodological aspects of interpreting the infrastructure of oil and gas fields using high-resolution images. *InterCarto. InterGIS*. 2018. Vol. 24. Iss. 2. P. 83-93. https://doi.org/10.24057/2414-9179-2018-2-24-83-93 (in Russian)
9. Klimenko S.K., Ivanov A.Yu., Evtushenko N.V. Oil pollution in the Gulf of Oman based on spaceborne radar monitoring data. *Ocean Research*. 2023. Vol. 51. Iss. 1. P. 114-132. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(1).6 (in Russian)
10. Klochko T.A. Study of the current state of issues regarding the detection of saline soils using satellite imagery data. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Geography*. 2010. Vol. 23. Iss. 2. P. 156-166. (in Russian)

11. Kozhanov K.A., Kulik E.N. Assessment of the information capacity of Sentinel-2 remote sensing data for monitoring soil pollution by petroleum products in the Polar Arctic. *Interexpo Geo-Siberia*. 2021. Vol. 6. P. 149-154. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-6-149-154 (in Russian)
12. Kopylov V.N., Kochergin G.A., Polishchuk Yu.M., Khamedov V.A. Application of remote sensing data at the decision of regional tasks of rational usage by natural resources. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2009. Vol. 6. Iss. 1. P. 33-41. (in Russian)
13. Kulik E.N., Baykin D.A. Oil product spills on the water surface: methods for analyzing Earth remote sensing data for their detection. *Bulletin of SSUGT*. 2022. Vol. 27. Iss. 4. P. 61-73. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2022-27-4-61-73 (in Russian)
14. Kuchin L.S. Application of Earth remote sensing to identify the consequences of technogenic transformation of the natural environment at oil and gas fields. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2025. Vol. 11. Iss. 1. P. 57-70. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-57-70 (in Russian)
15. Mikhailov S. I. Methodology for detecting instances of terrestrial environmental pollution using satellite observation data. *Issues of Risk Analysis*. 2009. Vol. 6. Iss. 1. P. 32-37. (in Russian)
16. Myachina K.V., Malakhov D.V. Experience in using medium-spatial-resolution remote sensing data to identify oilfield facilities in a technogenically modified landscape (case study of the Orenburg Region). *Izvestia RAS SamSC*. 2013. Vol. 15. Iss. 3-7. P. 2341-2345. (in Russian)
17. Nazdrachev P.I., Chermoshentsev A.Yu. Application of active remote sensing methods for oil spill detection. *Interexpo GEO-Siberia*. 2021. Vol. 6. P. 213-218. https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-6-213-218 (in Russian)
18. Ostakh S.V., Bakhtina E.A., Kusheeva V.S. Predictive system for remote monitoring of oil-contaminated areas. *Information and Space*. 2020. Iss. 3. P. 153-163. (in Russian)
19. Razakova M.G. Detection and mapping of soil oil contamination using remote sensing data. *Problems of Informatics*. 2017. Iss. 4. P. 6-15. (in Russian)
20. Sagatdinova G.N., Nurseitov D.B. Processing of Sentinel-1 satellite radar data for oil spill identification in the Caspian Sea waters using the GEE environment. *Hydrometeorology and Ecology*. 2024. Vol. 112. Iss. 1. P. 100-109. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-100-109 (in Russian)
21. Solntseva N.P. Oil extraction and the geochemistry of natural landscapes. Moscow: MSU Press, 1998. 376 p. (in Russian)
22. Tokareva O.S., Polishchuk Yu.M. Monitoring the condition of dark-coniferous forests in atmospheric pollution zones within oil-producing fields. *Interexpo Geo-Siberia*. 2009. P. 177-181 (in Russian)
23. Khamedov V.A., Davydova N.V. Assessment of potential gas-chemical pollution in prospective specially protected natural forest areas caused by associated petroleum gas flaring emissions. *Issues of Forest Science*. 2023. Vol. 6. Iss. 1. P. 73-90. https://doi.org/10.31509/2658-607x-202261-119 (in Russian)
24. Chaikin S.A., Buzmakov A.S., Simonov V.E. Current understanding of the technogenic transformation of the natural environment during oil field exploitation and the role of areas with special nature-use regimes. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2025. Vol. 11. Iss. 1. P. 71-82. https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-71-82 (in Russian)
25. AbdelRahman Mohamed. A.E., Afiff Ahmed A., D'Antonio Paola, Gabr Safwat S., Scopa Antonio. Detecting and Mapping Salt-Affected Soil with Arid Integrated Indices in Feature Space Using Multi-Temporal Landsat Imagery. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 11. https://doi.org/10.3390/rs14112599
26. Anucha J.A. Kumar Sanjit, Bas Bhaskar. Multi-Index satellite-based assessment of soil surface dynamics in the Niger Delta (Nigeria). *Frontiers in Earth Science*. 2026. Vol. 14. https://doi.org/10.3389/feart.2026.1834748
27. Chaturvedi S.K., Banerjee S., Lele S. An assessment of oil spill detection using Sentinel 1 SAR-C images. *Journal of Ocean Engineering and Science*. 2020. Vol. 5. Iss. 2. P. 116-135. https://doi.org/10.1016/j.joes.2019.09.004
28. El-Magd I.A., Zakzouk M., Ali E. Mapping oil pollution in the Gulf of Suez in 2017–2021 using Synthetic Aperture Radar. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2023. Vol. 26. Iss. 3. P. 826-838. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.08.005
29. Orogbemi O.M., Ewaregbemi S.B. Development of Ilajeland Degradation System in Crude Oil Exploitation Areas Using Satellite Imagery and Support Vector Machine Model. *International Journal of research and innovation in applied science (IJRIAS)*. 2026. Vol. 11. Iss. 7. P. 1273-1283. https://doi.org/10.51584/IJRIAS.2026.11070088
30. Taghadosi M.M., Hasanlou M., Eftekhari K. Retrieval of soil salinity from Sentinel-2 multispectral imagery. *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52. Iss. 1. P. 138-154. https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1571870
31. Unger D., Bowes C., Farrish K. Mapping oilfield brine-contaminated sites with mid-spatial resolution remotely sensed data. *GIScience and Remote Sensing*. 2013. Vol. 50. Iss. 6. P. 623-632. https://doi.org/10.1080/15481603.2013.850252
32. Varon D., Jervis D., McKeever J. High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. Iss. 4. P. 2771-2785. https://doi.org/10.5194/amt-14-2771-2021

Поступила в редакцию / Received: 10.09.2026
Поступила после рецензирования / Revised: 09.10.2026
Принята к публикации / Accepted: 21.10.2026