

Обзорная статья

 УДК 504.064.2 <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-57-70> EDN LPUGKX

Применение дистанционного зондирования Земли для выявления последствий техногенной трансформации природной среды на месторождениях нефти и газа

Леонид Сергеевич Кучин

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

kleond@bk.ru

Аннотация. В обзоре представлен анализ способов применения дистанционного зондирования Земли для выявления последствий техногенной трансформации природной среды на месторождениях нефти и газа. Дана характеристика основных видов техногенного воздействия на нефтепромысловых объектах (механогенеза, битумизации и галогенеза) и их распределение по этапам обустройства и эксплуатации месторождений. Дан обзор региональных особенностей антропогенных нарушений различного типа. Обсуждаются существенные различия в потенциале использования космической съемки (по различным спутникам) для выявления нефтепромыслового техногенеза. Они заключаются в таких характеристиках спутниковой съемки как: пространственное разрешение, периодичность и охват спектрального диапазона. Основные сферы применения космических снимков для изучения нефтепромысловой трансформации: выявление пространственных характеристик инфраструктуры месторождений, определение последствий крупных утечек нефти, оценка площади сведенного, в ходе обустройства месторождений, леса. Для беспилотных летательных аппаратов приведены наиболее перспективные типы дополнительных нагрузок: мультиспектральные и тепловизионные камеры, LIDAR, газоанализаторы. Опыт предыдущих исследований техногенных процессов трансформации при помощи БПЛА показал преимущество БПЛА по детальности дешифрируемых процессов техногенной трансформации. Предполагается возможность интеграции данных аэрофотосъемки, полевых обследований и спутниковых изображений в геоинформационную систему, направленную на выявление техногенной трансформации природной среды при разработке и эксплуатации месторождений углеводородов.

Ключевые слова: техногенное воздействие, ДЗЗ, БПЛА, добыча нефти и газа, ГИС

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 24-17-20025, <https://rscf.ru/project/24-17-20025/>

Для цитирования: 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>. EDN LPUGKX.

Review Paper

Remote sensing application to identify the consequences of technogenic transformation of nature at oil and gas fields

Leonid S. Kuchin

Perm State University, Perm, Russia

kleond@bk.ru

Abstract. The review presents an analysis of the methods of using remote sensing of the Earth to identify the consequences of technogenic transformation of the natural environment at oil and gas fields. The characteristics of the main types of technogenic impact at oil field facilities (mechanogenesis, bitumenization and halogenesis) and their distribution by the stages of field development and operation are given. An overview of regional features of anthropogenic disturbances of various types is given. The essential differences in the potential of using space imagery (from different satellites) to identify oil field technogenesis are discussed. They consist in such characteristics of satellite imagery as: spatial resolution, periodicity and spectral range coverage. The main areas of application of space images for studying oil field transformation are: identifying the spatial characteristics of field infrastructure, determining the consequences of large oil leaks, assessing the area of forest cleared during field development. The most promising types of additional loads for unmanned aerial vehicles are given: multispectral and thermal imaging cameras, LIDAR, gas analyzers. The experience of previous studies of technogenic transformation processes using UAVs has shown the advantage of UAVs in terms of

the detail of deciphered technogenic transformation processes. It is assumed that it will be possible to integrate aerial photography data, field surveys and satellite images into a geoinformation system aimed at identifying technogenic transformation of the natural environment during the development and operation of hydrocarbon deposits.

Key words: technogenic impact, remote sensing, UAV, oil and gas production, GIS.

Funding: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Perm region № 24-17-20025, <https://rscf.ru/project/24-17-20025/>

For citation: Kuchin, L., 2025. Remote sensing application to identify the consequences of technogenic transformation of nature at oil and gas fields. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 11(1), pp. 57-70. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2025-1-57-70>. EDN LPUGKX. (in Russian)

Введение

Наращивание темпов разработки месторождений нефти и газа приводит к возрастанию антропогенной нагрузки на природные среды. Большая площадь месторождений, их удаленность и труднодоступность являются основными проблемами при общепринятом обследовании воздействия нефтепромысловых объектов на окружающую среду [6]. Такой же проблемой является отсутствие возможности ежегодных обследований для составления хронологии развития негативного воздействия. В последнее время для решения этих проблем все чаще предлагается использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [14, 60].

Процесс добычи нефти и газа сопровождается процессами извлечения и перемещения минеральных и органических веществ, нарушает структуру функционирования круговоротов веществ природных экосистем, что проявляется в виде антропогенной трансформации природной среды. Под антропогенной трансформацией подразумевается – процесс изменения природных компонентов и комплексов под воздействием производственной и любой другой человеческой деятельности [7]. Как отмечает [25] антропогенное воздействие (трансформация) и техногенез достаточно схожи, однако следует заметить, что техногенез проявляется не просто в человеческой деятельности, а именно в производственной деятельности человека. Данное отличие наиболее четко отражено в определении данным [40] «Техногенез – процесс изменения природных комплексов под воздействием производственной деятельности человека. Заключается в преобразовании биосферы, вызываемом совокупностью геохимических процессов, связанных с технической и технологической деятельностью людей по извлечению из окружающей среды, концентрации и перегруппировке целого ряда химических элементов, их минеральных и органических соединений».

Сам термин техногенез был предложен А.Е. Ферсманом в 1930-х гг. Р.К. Баландин определял техногенез как процесс перестройки биосферы, земной коры и околоземного Космоса, вызванный человеческой деятельностью [13].

Возникающий при добыче нефти и газа техногенез природных сред, разделяют на первичный и вторичный. Первичный представляет собой нарушение природной среды, прямо связанное с эксплуатацией объектов нефтяных и газовых промыслов или их строительством. Вторичный техногенез выражается в виде реакции экосистем на техногенный пресс [30, 44].

Техногенез природной среды разделяют на механо-генез, битумизацию, галогенез и загрязнение воздуха. Под механогенезом подразумевают физические воздействия производственной деятельности. Галогенез,

битумизация и загрязнение воздуха представляют собой геохимическое воздействие [9, 50].

Техногенная трансформация при добыче нефти и газа

Техногенное воздействие на природную среду является на всех этапах нефтепромысловой деятельности. На этапе обустройства выявляют воздействия в первую очередь, вызванные строительством, прокладкой дорог, бурением скважин. Другим этапом является эксплуатация нефтепромыслов. Этот этап включает в себя два режима эксплуатации: нормальный и аварийный [44]. При нормальном режиме эксплуатации воздействие на природные экосистемы проявляется в виде работы транспорта и тяжелой техники, выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, возникающих при сжигании попутного газа. Аварийный режим эксплуатации связан с разливами нефти, пластовых и сточных вод, пожарами [45]. Помимо вышеперечисленных этапов, необходимо также выделить поисково-разведочный этап. Воздействие на этом этапе происходит при сейсморазведке, в особенности при использовании взрывов как источников волны [13].

Проявление механогенеза при нефтепромысловом воздействии наиболее активно проявляется на этапе обустройства и строительства месторождений. В первую очередь это выражается в прокладке и обустройстве инфраструктуры месторождений [44]. Отсыпка дорог и обустройство площадок скважин приводит к поступлению в базовые экосистемы нового материала (почв, растительности, загрязняющих веществ). При этом происходит изъятие и нарушение почвенного покрова, формирование техногенных почв и изменение водного режима территории месторождения нефти [43]. Механическое воздействие также может быть выявлено на этапах разведки, особенно на территориях с легкодоступными для проезда ландшафтами [33].

Основные виды механогенеза, выявленные по беспилотной аэрофотосъемке, приведены на рис. 1 / fig. 1.

На всех этапах развития месторождений нефти происходит формирование новых форм рельефа, вызванное механическими процессами. Эти формы рельефа можно разделить на две категории: положительные и отрицательные. К положительным формам рельефа относятся отвалы вскрышных пород, обваловка нефтепромысловых объектов и дорожные насыпи. Отрицательные формы рельефа включают в себя траншеи, возникающие при прокладке трубопроводов, а также карьеры [44]. Эти изменения рельефа как правило приводят к нарушению водного режима территории и возникновению вторичных форм рельефа, таких как оползни, овраги, промоины и просадки грунта [6].



Рис. 1. Изображения основных объектов механогенеза [8]

Fig. 1. Images of the main objects of mechanogenesis [8]

В результате изменения рельефа, почвенного покрова и гидрологического режима происходит угнетение растительности и изменение состава растительных сообществ на территории месторождения нефти и газа. При строительстве дорог, линий электропередачи и трубопроводов происходит вырубка деревьев и кустарников вдоль всей протяженности данных объектов инфраструктуры месторождений [13].

По данным [32] под инфраструктуру месторождений в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО), отводится в среднем 3,7% от территории нефтяного месторождения. При этом доля земель, нарушенных инфраструктурой месторождения, варьирует от 1,05 до 10,5% от площади всего месторождения. В доле инфраструктуры нефтяных месторождений ХМАО свойственно преобладание доли линейных объектов инфраструктуры над площадными объектами. Это свидетельствует о том, что преобладающую долю механогенеза составляют: дорожная сеть, трубопроводы и линии электропередач.

Таким образом, механогенез на нефтепромысловых объектах выражен следующими типами антропогенной трансформации природной среды:

- 1) Морфологическое и физическое изменение почвенного покрова территории;
- 2) Преобразование рельефообразующих процессов и самого рельефа;
- 3) Нарушение гидрологического, гидрохимического и температурного режима территории;
- 4) Деградацию растительного покрова, включая полное уничтожение растительности.

Помимо физического воздействия на природную среду разработка месторождений нефти и газа, также выражается в геохимическом воздействии. Этот тип воздействия проявляется в виде процессов битумизации, галогенеза и загрязнения атмосферы [9].

Изменение геохимических процессов на территории месторождений углеводородов, связанное с эксплуатацией нефтепромысловых сооружений, обусловлено различными типами техногенных потоков. Основными причинами возникновения техногенных потоков являются аварии на нефтепромысловых объектах, вызванные коррозией, дефектами оборудования и несоблюдением технологических регламентов [44].

Аварии на разведочных и эксплуатационных скважинах являются одним из основных источников загрязнения нефтью и жидкостями, содержащими нефтепродукты. Процесс битумизации происходит в результате утечек загрязняющих веществ при разрывах трубопроводов, а также при некорректной эксплуатации хранилищ нефтепродуктов и пунктов подготовки нефти [11]. Данный тип загрязнения, характерный для территорий нефтепромыслов, является одним из основных [9].

Техногенные загрязнения нефтью классифицируются на поверхностные и глубинные. Поверхностные загрязнения возникают в результате нарушения технологических регламентов при добыче, транспортировке нефти, а также при работах, связанных с ремонтом и ликвидацией нефтяных скважин. Глубинные загрязнения обусловлены нарушением герметичности скважин, что приводит к выдавливанию нефти в породы за

пределы скважин из-за создания избыточного давления воды в продуктивных пластах [27].

Загрязнение почв нефтью приводит к серьезным и необратимым изменениям почвенного состава, что, в свою очередь, вызывает снижение водопроницаемости, гигроскопической влажности и влагоемкости. Помимо этого, загрязнение нефтепродуктами оказывает влияние на биологические свойства почвенного покрова, повышая фитотоксичность почв [10].

В процессе бурения скважин, помимо нефти, извлекаются пластовые воды. Эти воды характеризуются высокой минерализацией и относятся к хлоридно-натриевому или хлоридно-кальциевому типу. В результате воздействия высоко минерализованных пластовых вод на природную среду активизируется процесс техногенного галогенеза [18].

Под техногенным галогенезом понимается процесс засоления почв, грунтов, подземных и поверхностных вод. Этот вид техногенного геохимического воздействия является одним из наиболее распространенных процессов преобразования природной среды на нефтяных месторождениях [9].

Длительное воздействие галогенеза приводит к изменению растительных сообществ, что выражается в распространении растений, адаптированных к высокому содержанию солей в почве (эвривалентных). При этом доля таких растений может увеличиваться в три раза. В результате утечки высокоминерализованных вод происходит их накопление в отрицательных формах рельефа, что вызывает рост минерализации поверхностных вод [46].

Помимо процессов битумизации и галогенеза, одним из распространённых видов геохимического воздействия на природную среду является загрязнение атмосферного воздуха. Для месторождений нефти и газа одним из основных источников загрязнения атмосферы является сжигание попутного нефтяного газа в факелах. В результате этого процесса в атмосферу выбрасываются различные загрязняющие вещества, такие как угарный газ (CO), диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), смеси углеводородов, сероводород (H_2S) и бенз(а)пирен ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$) [51].

Таким образом, техногенное геохимическое воздействие оказывается на всех этапах добычи нефти и газа. На этапе бурения скважин могут происходить разливы нефти, высоко минерализованных межпластовых вод и буровых растворов. В процессе эксплуатации нефтепромысловых объектов могут возникать аварийные утечки нефти, сточных вод и содержимого амбаров и шламонакопителей. В случае наличия на месторождении факельной установки, в атмосферу выбрасываются парниковые газы и вещества, относящиеся к высоким классам опасности, такие как угарный газ и аммиак [44]. Также установки для сжигания попутного нефтяного газа оказывают тепловое воздействие на окружающую их природную среду и выбрасывают несгоревшие нефтепродукты, которые при попадании в почву могут привести к процессу битумизации верхних почвенных слоев [41].

Добыча и транспортировка нефти и газа, во многих случаях происходит в труднодоступных районах. К таким территориям могут быть отнесены районы со

сложным рельефом и очень суровыми климатическими условиями. В подобных условиях качество проведения мониторинга нефтепромысловых объектов снижается [38].

Заболоченные территории также представляют собой условия, ограничивающие проведение полноценного мониторинга нефтепромыслового воздействия. Болотные экосистемы характеризуются высокой чувствительностью к техногенным процессам, связанным с разведкой и добычей нефти. Установлена низкая устойчивость болотных почв к геохимическому техногенному воздействию, поскольку они способны накапливать загрязняющие вещества, поступающие с межпластовыми водами и буровыми растворами, такие как K^+ , Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , HCO_3^- и Ca^{2+} [20].

Контроль техногенных процессов в болотных экосистемах имеет большое значение, поскольку болота являются резервуарами пресной воды и оказывают косвенное влияние на геолого-геоморфологические процессы. Они уменьшают интенсивность эрозии, ослабляя инфильтрацию поверхностных вод в грунт, и увеличивают горизонтальный сток в речную сеть. Кроме того, болотные экосистемы характеризуются уникальными растительными сообществами [1, 17].

Для мониторинга подобных, труднодоступных экосистем в последнее время все чаще предлагается использование дистанционного зондирования Земли. Особенно при условии возможности получения хронологически длинных рядов данных [38].

Съемка Земли из космоса

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса позволяет получать актуальные данные о состоянии поверхности Земли, атмосферного воздуха, поверхностных вод, а также объектах, находящихся на Земной поверхности.

Под ДЗЗ принято подразумевать метод оценки свойств объектов на поверхности земли при помощи, как спутниковой съемки, так и различных воздушных летательных аппаратов [54].

Процесс определения объектов, изучения их характеристик и взаимосвязей на основе данных, полученных с помощью ДЗЗ, называется дешифрированием. Основная цель дешифрирования данных ДЗЗ – получение информации о структуре, составе, метрических характеристиках, состоянии объектов и явлений, а также о динамике процессов, характерных для этих объектов. Для успешного дешифрирования исследуемые объекты должны иметь четко выраженные дешифровочные признаки. Дешифровочные признаки можно разделить на прямые, которые присущи непосредственно изображениям исследуемых объектов (спектральные и метрические характеристики), и косвенные, проявляющиеся посредством другого компонента окружающей среды [53].

В настоящее время наблюдается активное развитие области ДЗЗ, что приводит к увеличению разнообразия систем ДЗЗ и повышению качества их оснащения. Современные искусственные спутники Земли способны осуществлять съемку в десятках различных диапазонов электромагнитного спектра с разрешением от одного километра до нескольких десятков сантиметров. Кроме того, применяются гиперспектральные системы

ДЗЗ, которые охватывают большое количество спектральных зон шириной по 10 нм [54].

Выделяют несколько основных технических характеристик спутниковых данных ДЗЗ: разрешение, сезонность съемки и ширина полосы обзора. Для спутниковых снимков можно выделить три типа разрешений: пространственное, отражающее детальность съемки, спектральное характеризующееся шириной спектра

съемки, и временное, определяющее периодичность получения конкретной территории [52].

Пространственное разрешение выражается размером участка земной поверхности, приходящимся на минимальный элемент цифрового снимка (пиксел) [69]. В табл. 1 / tabl. 1 приведена классификация спутниковых снимков в соответствии с пространственным разрешением.

Таблица 1

Классификация спутниковых снимков по пространственному разрешению [53, 66]

Table 1

Classification of satellite images by spatial resolution [53, 66]

Категории разрешений // Resolution Categories	Разрешение, м // Resolution, m
Сверхвысокое // Ultra-high	<1
Высокое // High	1-10
Среднее // Average	10-30
Низкое // Low	30-250
Очень низкое // Very low	250-3000

Характеристика спектрального разрешения снимка определяется шириной спектральных полос, количеством и типом спектральных каналов. Наименьшее разрешение данного типа (до 400 нм) характерно для снимков в видимом диапазоне или панхроматических снимков. Наивысшее спектральное разрешение свойственно гиперспектральным снимкам, имеющим спектральные зоны шириной 10 нм [53].

Временное разрешение представляет собой периодичность выполнения съемки объектов на определен-

ной территории. Периодичность съемки со спутника определяется протяженностью и формой орбиты, по которой движется космический аппарат. Орбита рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить наиболее полное покрытие поверхности Земли [54].

Наиболее доступными и часто используемыми источниками данных ДЗЗ являются спутники серии Landsat и Sentinel. Данные спутники предоставляют снимки среднего разрешения. Характеристики спутниковых комплексов представлены в табл. 2 / tabl. 2.

Таблица 2

Характеристика наиболее часто используемых спутниковых комплексов [24, 31, 53]

Table 2

Characteristics of the most frequently used satellite systems [24, 31, 53]

Спутник // Satellite	Разрешение, м // Resolution, m		Ширина полосы съемки, км // Width of survey strip, km	Периодичность съемки // Frequency of shooting
	Панхроматическая // Panchromatic	Гиперспектральная // Hyperspectral		
Landsat 5	—	30-120	185	1 раз в 16 дней // 1 time in 16 days
Landsat 7/8	15	30-100	185	1 раз в 16 дней // 1 time in 16 days
Sentinel-2	20	60	290	От 5 дней на экваторе до 3 в средних широтах // From 5 days at the equator to 3 in mid-latitudes

С помощью космической съемки в панхроматическом спектре проводится оценка инфраструктуры месторождений нефти и газа, ее воздействия на природную среду. При этом выделяют степень деградации земель и уровень распространения механогенеза [33].

Данные, полученные с помощью спутникового комплекса Landsat, позволяют проводить оценку изменений территории за длительный период времени, поскольку первый спутник этого комплекса был запущен в 1984 году. Большой объем материалов за длительный период времени даёт возможность анализировать динамику экосистем на различных этапах обустройства и эксплуатации нефтепромыслов. Снимки со спутников могут быть получены не только в видимом, но и

в мультиспектральном диапазоне, что позволяет оценивать различные характеристики, которые не столь очевидно воспринимаются глазом [57].

Мультиспектральная съемка позволяет проводить синтез различных каналов и формировать из них индексы, отображающие те или иные явления в окружающей среде. Для повышения полноты оценки воздействия добычи нефти все чаще используют комплекс данных ДЗЗ [15]. Как в России, так и за рубежом предлагается использовать комплекс видимого спектра с различными вегетационными индексами [34, 67]. Наиболее часто используют синтез нормализованного относительного индекса растительности (NDVI), благодаря которому определяют особенности развития

растительности, степень покрытия растительностью, а также временные изменения растительного покрова [48].

Синтез NDVI активно используется для оценки динамики ландшафтных изменений, происходящих на нефтяных месторождениях, поскольку для данного типа техногенного воздействия свойственно нарушение растительного покрова при прямом или косвенном сведении растительности [68].

Наиболее качественно оценивать состояние экосистем по данным ДЗЗ можно на основе комплекса мультиспектральных индексов. Таким образом оценку состояния древостоя рекомендуется проводить по относительному показателю, включающему NDVI, GNDVI (показатель содержания хлорофилла), NBR (показатель пирогенных повреждений растительности), SWVI (показатель содержания влаги и хлорофилла в зеленых фракциях растений). Считается, что данный комплекс позволит снизить влияние сезонных и межгодовых колебаний вегетации [16].

Помимо оценки состояния растительности можно получать более точную информацию о расположении и площади нефтяных загрязнений почвы и инфраструктуры нефтяных месторождений, при помощи комплекса канала SWIR (коротковолновый инфракрасный канал) с NDVI и SAVI (почвенно скорректированный индекс растительности) [39]. Кроме этого SWIR, применяют для получения достаточно точных данных содержания CO_2 и CH_4 в нижней тропосфере. Данные, полученные в этом канале, могут быть использованы для контроля выбросов парниковых газов в атмосферу [4].

Значения NDVI дают возможность отслеживать процессы рекультивации нефтепромысловых объектов. Применение мультиспектральных спутниковых данных и ГИС-технологий позволяют проводить картографирование и пространственный анализ труднодоступных территорий, и повысить скорость принятия решений, направленных на устранение и профилактику загрязнения природных сред [37].

Спутники Landsat-7/8 оснащены каналом, дающим термальные характеристики поверхности земли [55]. Изучение теплового режима месторождений нефти и газа имеет важное значение, поскольку изменения температурного режима подстилающей поверхности в районах с интенсивным влиянием инфраструктуры могут привести к серьезным экологическим последствиям [26].

Кроме съемки в различных спектральных диапазонах, спутниковое ДЗЗ включает в себя радиолокационную съемку, которая является основой для построения цифровых моделей рельефа и местности [52]. Цифровые модели позволяют получать морфометрические показатели рельефа, в которые входят длина водотоков, крутизна склонов, кривизна поверхности рельефа, водосборные бассейны водных объектов. Эти данные являются полезными для учета особенностей миграции углеводородов [2]. Что особенно важно для обеспечения экологической безопасности месторождений нефти и газа, расположенных в сложных горно-геологических условиях [22].

Беспилотная аэрофотосъемка

В последнее время в области ДЗЗ наблюдается увеличение использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в различных областях деятельности,

включая добычу нефти и газа [9]. Основными преимуществами БПЛА являются простота использования, компактность, небольшой вес, возможность установки оборудования для отбора проб и проведения съёмки. Беспилотники квадрокоптерного типа также не требуют специальных условий для взлёта и посадки. В отличие от спутникового зондирования, применение БПЛА обеспечивает более высокое пространственное разрешение, что повышает точность определения объектов техногенного воздействия [76]. Однако снимки, полученные с помощью БПЛА, имеют ограниченную площадь покрытия по сравнению со снимками, полученными со спутников. Кроме того, сильные перепады высот могут ограничивать дальность полёта БПЛА [35].

Первоначально БПЛА использовались в военных целях. Однако после их появления в гражданском секторе мониторинг состояния атмосферы, гидросферы, объектов природной среды и техносферы стал значительно проще. БПЛА применяются в различных областях, таких как оценка качества воздуха, выявление разливов опасных веществ, обнаружение несанкционированных свалок, оценка целостности инфраструктуры и выявление других нарушений [61].

На борт БПЛА можно устанавливать разнообразные приборы, для мультиспектральной или гиперспектральной съемки, а также для зондирования при помощи лидаров [59]. Данные приборы позволяют производить дополнительные измерения, которые дополняют спектр получаемой информации об объекте исследования.

Оптическая аэрофотосъемка широко используется для оценки состояния лесных массивов, включая вырубки, возникающие в процессе строительства объектов нефтегазовой промышленности [71]. Панхроматическая съемка позволяет определить сухостой, а также проводить учет отдельных деревьев [42].

БПЛА могут быть оборудованы дополнительной нагрузкой для осуществления мультиспектральной съемки и съемки в инфракрасном диапазоне [3]. Мультиспектральная съемка основана на использовании данных, полученных в различных диапазонах электромагнитного спектра, включая невидимые для человеческого глаза участки спектра. Поскольку различные типы земной поверхности отражают свет с разной интенсивностью и частотой, данный метод особенно эффективен для сбора информации об изменениях в лесном покрове [29].

Благодаря снимкам, полученным с БПЛА, в видимом и инфракрасном диапазонах можно оценить успешность рекультивационных работ, выполненных на территориях, ранее использовавшихся для добычи нефти и газа [70]. Съемка в видимом спектре, как и мультиспектральная съемка, применяются для идентификации разливов нефти в водных объектах [67].

Тепловизионная аэрофотосъемка используется для оценки техногенных и природных объектов [28]. Она позволяет обнаруживать тепловые аномалии с высоким пространственным и температурным разрешением. Этот метод применяется для выявления разливов нефти. Однако при увеличении количества анализируемых объектов качество выделения разлива из общего фона температур снижается [58]. Наиболее качественно определяются разливы нефти на воде

с точностью до 89%, при этом разработаны программы машинного обучения для определения разливов [62]. Помимо разливов нефти, тепловизионная аэрофотосъемка используется для обнаружения утечек газа, нефти и воды из трубопроводов [56], можно предупреждать и контролировать пожары и долгосрочные горения, возникающие при авариях на нефтедобывающих участках [73].

Поскольку важным аспектом для изучения процессов, происходящих в природных средах, является рельеф, то очень полезным применением БПЛА является проведение зондирования LIDAR (Light Identification Detection and Ranging) [23]. Применение технологии LIDAR позволяет создавать высокоточную цифровую модель рельефа местности. Важной характеристикой данного вида съемки является его низкая чувствительность к кронам деревьев, кустарникам и травянистому покрову, что позволяет учитывать особенности рельефа в условиях лесного массива. Этот метод особенно полезен при создании моделей рельефа в труднодоступных районах [19]. В отличие от наземного сканирования, преимуществом сканеров LIDAR установленных на борту БПЛА является большая по площади зона сканирования. Однако точность и детальность получаемых результатов пока что остается ниже, чем у наземного лазерного сканирования [12].

Беспилотная аэрофотосъемка довольно широко используется в области регистрации нефтепромыслового техногенеза. В основном БПЛА применяют для фиксации разливов нефти и расчетов площади инфраструктуры месторождений [74]. Наиболее удобно использовать беспилотники для мониторинга таких линейных объектов инфраструктуры как трубопроводы, поскольку они могут пролетать в труднодоступных условиях. Таким образом, БПЛА могут проводить мониторинг объектов нефтепромысла, расположенных в горах или на болотах [65].

Выявлять загрязнение окружающей среды можно не только по съемке, но и при помощи интеграции на БПЛА газоанализаторов способных определять места утечки газа [47]. Основные проблемы, ограничивающие использование газоанализаторов на борту БПЛА являются: слабая дифференциация газов, направленная на регистрацию всех метаногенных образований, а также фиксация только высоких концентраций газов [49]. Проектировать бортовые газоанализаторы для мониторинга состояния атмосферы начали сравнительно недавно, это связано с появлением недорогих датчиков используемых, как правило в сочетании с традиционным оборудованием для контроля качества воздуха. Такие датчики можно откалибровать на концентрации близкие к фоновым [75]. В настоящее время наиболее коммерчески успешным газоанализатором для мониторинга является Sniffer 4D, который может быть интегрирован на БПЛА компании DJI. С помощью данной дополнительной нагрузки производился мониторинг за вулканическими выбросами, в составе которых фиксировались: O_2 , SO_2 , CO , CO_2 , NO_2 , O_3 , NO_2 и взвешенные частицы [64]. Также преимуществом этих газоанализаторов для мониторинга месторождений нефти и газа является низкий порог фиксации газов. Большинство газов, фиксируемых в ходе

газогеохимических обследований, не имеют нижнего предела регистрации [72].

Наиболее полно оценить последствия техногенных процессов на территории месторождений нефти позволяет комплекс данных ДЗЗ. Применение комплекса данных, полученных при помощи ДЗЗ как со спутников, так и с БПЛА позволило провести комплексный мониторинг состояния государственного заповедника «Болоньский». При этом выделено преимущество БПЛА для мониторинга ландшафтной структуры в труднодоступных болотистых местностях [36].

Комплекс данных ДЗЗ и полевых обследований может быть объединен в геоинформационную систему. Геоинформационная система (ГИС) – информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных (пространственных данных) [5]. Использование ГИС становится ключевым инструментом для обеспечения экологической безопасности территорий. Геоинформационные технологии позволяют объединить результаты прямых полевых наблюдений за состоянием окружающей среды с лабораторными исследованиями устойчивости основных компонентов экосистем к природному и антропогенному воздействию [9].

Геоинформационные технологии обеспечивают: сбор пространственных данных, их обработку, отображение в едином пространстве, интеграцию данных о территории для анализа, моделирования, прогнозирования, управления сохранением целостности природной среды [21]. Прикладная значимость ГИС для отрасли добычи, транспортировки и переработки нефти и нефтепродуктов заключается в мониторинге объектов и ближайшей зоны моделирования угроз разлива нефти и нефтепродуктов, предупреждении возможных чрезвычайных ситуаций [63].

Заключение

Масштаб техногенной трансформации связанной с воздействием добычи нефти и газа постоянно растет. Для снижения степени нагрузки на природные среды необходимо выявление очагов техногенного воздействия, особенно на труднодоступных для классических методов мониторинга территориях. Поэтому актуально использовать дистанционное зондирование Земли, как по спутниковым снимкам, так и при помощи БПЛА.

В проведенной работе установлено, что основными видами техногенного воздействия на нефтепромысловых объектах являются механогенез, битумизация и галогенез. Данные типы антропогенного воздействия распространены на всех этапах обустройства и эксплуатации месторождений нефти и газа. Самые часто применяемые для выявления нефтепромыслового техногенеза источники данных ДЗЗ представлены группами спутников Landsat и Sentinel. Выявлено что наиболее часто космические снимки в видимом диапазоне используют для выявления объектов инфраструктуры месторождений. Наиболее информативным для оценки качества среды является индекс NDVI, который используется как основа комплексов мультиспектральных индексов, получаемых при использовании гиперспектральной съемки. Для моделирования харак-

теристик рельефа и гидрологической сети на месторождениях нефти и газа можно использовать цифровые модели рельефа, построенные на основе радиолокационной спутниковой съемки.

Все чаще предлагается оценка качества природной среды при помощи БПЛА. При этом основными преимуществами беспилотной съемки над спутниковой являются более высокое разрешение и возможность использования различной по функционалу дополнительной нагрузки. Наиболее перспективной дополнительной нагрузкой для оценки техногенной трансформации на месторождениях нефти и газа, помимо мультиспектральных камер, являются аппараты Lidar и газоанализаторы. Комплекс всех этих приборов позволит дополнить и уточнить данные космических спутников.

Данные дистанционного зондирования Земли, полученные как с космических спутников, так и с БПЛА являются качественной основой для формирования геоинформационных систем, направленных на мониторинг и прогнозирование техногенной трансформации природной среды, вызванной негативным воздействием на различных этапах эксплуатации месторождений углеводородов. Данные ДЗЗ могут быть использованы для верификации признаков техногенеза, обнаруженных в ходе полевых обследований. Что позволит применять эти признаки для анализа других территорий месторождений нефти и газа, обследование которых осложнено в связи с их труднодоступностью.

Список источников

1. Абдулманова И.Ф., Игошева Е.А. Сопоставление параметров экотопов болотных фитоценозов и глубин торфяной залежи белого болота (Пермский край, Россия) // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2021. № 1. С. 48–64.
2. Агибалов А.О., Зайцев В.А., Сенцов А.А., Полежаев А.В., Мануилова Е.А. Морфометрические параметры рельефа и локализация месторождений углеводородов Волго-уральской антеклизы // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2021. № 4. С. 116–128.
3. Аникаева А.Д., Мартюшев Д.А. Оценка потенциала применения беспилотных летательных аппаратов в нефтегазовой отрасли // *Недропользование*. 2020. № 4. С. 344–355. <https://doi.org/10.15593/2712-8008/2020.4.4>
4. Асадов И.Х., Рамазанов А.М. Методика оценки объемов сжигаемого в факелах неувлажненного метана и его эмиссионных составляющих // *Электронный научный журнал нефтегазовое дело*. 2020. № 5. С. 39–51. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2020-5-39-51>
5. Ахметзянова Л.Г., Селивановская С.Ю., Латыпова В.З. Лабораторное моделирование рекультивации нефтезагрязненных почв для определения допустимого остаточного содержания нефтепродуктов // *Ученые записки Казанского университета. Естественные науки*. 2010. Т. 152. № 4. С. 68–77.
6. Бредихин А.В., Еременко Е.А., Харченко С.В., Беляев Ю.Р., Романенко Ф.А., Болысов С.И., Фузеина Ю.Н. Районирование Российской Арктики по типам антропогенного освоения и сопутствующей трансформации рельефа на основе кластерного анализа // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. № 1. С. 42–56.
7. Бузмаков С.А. Антропогенная трансформация природной среды // *Географический вестник*. 2012. № 4. С. 46–50.
8. Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Кучин Л.С., Игошева Е.А., Абдулманова И.Ф. Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // *Записки Горного института*. 2023. № 260. С. 180–193. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.22>
9. 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>
10. Булуктаев А.А. Аварийный разлив нефти на территории Тенгутинского нефтегазового месторождения, расположенного в пределах заповедника «Черные земли» // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2022. Т. 7. № 3. С. 43–51. <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-3-4>
11. Васильев А.В. Анализ источников загрязнения биосферы нефтепродуктами и особенности оценки их экологического воздействия // *Академический вестник ЕЛРПТ*. 2022. Т. 7. № 2(20). С. 15–20.
12. Васильева Е.А. Эффективность воздушного лазерного сканирования территории при мониторинге городских зеленых насаждений // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2021. № 2. С. 31–34. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-2-31-34>
13. Глебова Л.В., Буданов А.Б., Михайлова Е.А. Развитие регионального техногенеза при освоении нефтяных и газовых месторождений в Западной Сибири // *Геология, география и глобальная энергия*. 2020. № 3. С. 89–96.
14. Гордиенко А.С. Исследование возможности выявления негативного воздействия разливов нефти на окружающую растительность по данным дистанционного зондирования Земли // *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2021. Т. 26. № 6. С. 48–55. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-48-55>
15. Гулиев А.Ш., Хлебникова Т.А. Выявление мест нефтезагрязнений шельфовой зоны по материалам космических съемок (на примере акватории нефтяных Камней (Каспий)) // *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2019. Т. 24. № 3. С. 52–64. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-3-52-64>
16. Гусев А.П. Дистанционные индикаторы деградации лесных геосистем юго-востока Беларуси // *Весті БДПУ. Серія 3. Фізика. Математика. Інформатика. Біологія. Географія*. 2020. № 1(103). С. 46–50.
17. Двинских С.А., Ларченко О.В. Экологическая характеристика особо охраняемой природной территории местного значения «Утиное болото», г. Пермь // *Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле»*. 2019. № 1. С. 63–70.
18. Двуреченская Е.Б. Техногенный галогенез в торфяных болотных верховых почвах средней тайги Западной Сибири // *Географический вестник*. 2020.

№ 3(54). С. 148–158. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-3-148-158>

19. Демидов В.Э. Применение воздушного лазерного сканирования для картирования рельефа, поиска следов антропогенного воздействия и изучения растительного покрова на территории Приокско-Террасного государственного природного биосферного заповедника // Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П. Г. Смидовича. 2021. № 28. С. 74–82.

20. Дитц Л.Ю., Дудина Т.Н., Цусман Е.И., Катункина Е.В. Геоэкологические проблемы территорий нефтедобычи // Успехи современного естествознания. 2020. № 3. С. 72–77. <https://doi.org/10.17513/use.37348>

21. Долгополов Д.В., Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Геоинформационное обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводного транспорта // Известия ТПУ. 2021. № 12. С. 52–63. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/3028>

22. Егорова Д.О., Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Шестаков И.Е., Хотяновская Ю.В. Биоремедиационный потенциал природного микробиоценоза в условиях хронического нефтяного загрязнения // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 11. С. 60–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-60-65>

23. Ерин А.А., Хомоненко А.Д. Расчет предельно измеряемой дальности лидара на беспилотном летательном аппарате для задач распознавания объектов // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. № 2. С. 45–59. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2020-2-45-59>

24. Кабанов А.Н., Оспаналиев А.С., Кабанова С.А., Кочегаров И.С., Бекбаева А.М., Данченко М.А. Применение ГИС-технологий при обследовании состояния лесных культур в зеленой зоне г. Астаны // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2023. Т. 18. № 3. С. 361–372. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2023-18-3-361-372>

25. Карлович И.А. Современный техногенез. Владимир: ВлГУ, 2015. 165 с.

26. Карсаков А.А., Пономарёв Е.И. Дистанционный мониторинг теплового состояния подстилающей поверхности в контексте техногенных трансформаций // Биосфера. 2024. Т. 16. № 1. С. 20–29. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v16i1.890>

27. Катаев В.Н. Особенности углеводородного загрязнения сульфатно-карбонатных карстовых массивов // Сергеевские чтения: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Пермь, 02–04 апреля 2019 г. / под ред. В.И. Осипова, Н.Г. Максимовича, А.А. Баряха, Е.В. Булдаковой, А.Д. Деменева, О.Н. Ереминой, В.Г. Заиканова, В.Н. Катаева, Ю.А. Мамаева, О.Ю. Мещеряковой. Выпуск 21. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет. 2019. С. 309–314.

28. Катковский Л.В. Расчет параметров тепловизионной съемки объектов с беспилотных авианосителей // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 53–61. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-53-61>

29. Керимов И.А., Эзирбаев Т.Б. Использование мультиспектральной съемки при наблюдении за состоянием лесного покрова Земли // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 3. С. 182–194. <https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.33.001>

30. Масляев В.Н., Маскайкин В.Н., Егорова К.Д., Шабайкина В.А. Техногенез как фактор формирования техносферы // Научное обозрение. Международный научно-практический журнал. 2022. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://srjournal.ru/2022/id363/> (дата обращения: 19.03.2025).

31. Мелкий В.А., Верхотуров А.А. Геоинформационное и картографическое обеспечение мониторинга для оценки состояния природно-техногенных комплексов Сахалинской области // Геоконтекст. 2016. № 4. С. 30–44.

32. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г., Идрисов И.Р. Оценка техногенной нарушенности нефтяных месторождений Среднего Приобья с использованием спутниковых снимков // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 5. С. 53–61. <https://doi.org/10.31857/S0869780920050069>

33. Мячина К.В. Особенности воздействия объектов нефтегазодобывающей инфраструктуры на подзональные ландшафты Волго-Уральского степного региона // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2019. № 4. С. 21–29. <https://doi.org/10.24411/2304-9081-2019-15021>

34. Новохатин В.В., Осипова Н.Г. Космический мониторинг аварийных нефтеразливов в пределах лицензионных участков на территории Западной Сибири // Московский экономический журнал. 2021. № 3. С. 57–63. <https://doi.org/10.24412/2413-046X-2021-10167>

35. Овчинникова Н.Г., Медведков Д.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для ведения землеустройства, кадастра и градостроительства // Экономика и экология территориальных образований. 2019. Т. 3. № 1. С. 98–108. <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108>

36. Остроухов А.В., Климина Е.М., Купцова В.А. Ландшафтное картографирование труднодоступных территорий на примере государственного природного заповедника «Болоньский» (Россия) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2020. Т. 5. № 2. С. 47–63. <https://doi.org/10.24189/ncr.2020.015>

37. Перемитина Т.О., Яценко И.Г. Использование вегетационных индексов NDVI для оценки динамики растительности нефтедобывающих территорий Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. № 4. С. 154–163.

38. Прохоров А.В., Носков И.В. Мониторинг магистральных нефте-газопроводов при помощи беспилотных летательных аппаратов // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <https://esj.today/PDF/40NZVN622.pdf> (дата обращения: 20.03.2025).

39. Разакова М.Г. Выявление и картирование нефтяных загрязнений почв по данным дистанционного зондирования // Проблемы информатики. 2017. № 4. С. 4–15.

40. Реймерс Н.Ф. Природопользование. М.: Мысль, 1990. 637 с.

41. Рустамов З.А., Брюхова К.С. Проблема утилизации попутного нефтяного газа. Анализ и современное состояние // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2019. № 58. С. 102-109. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2019.58.08>
42. Санников П.Ю., Андреев Д.Н., Бузмаков С.А. Выявление и анализ сухостоя при помощи беспилотного летательного аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. № 3. С. 103-113. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113>
43. Соколов А.Н. Геоэкологические условия воздействия на почвенные ресурсы, на территории нефтяного месторождения Томской области // Московский экономический журнал. 2020. № 6. С. 20-29. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2020-10374>
44. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 376 с.
45. Соромотин А.В. Экологические последствия различных этапов освоения нефтегазовых месторождений в таежной зоне Тюменской области // Сибирский экологический журнал. 2011. Т. 18. № 6. С. 813-822
46. Соромотин А.В., Казанцева М.Н., Кремлева Т.А., Елизарова Д.П., Бродт Л.В., Фефилов Н.Н. Техногенный галогенез поверхностных вод и растительных сообществ в результате сброса минеральных вод на водосбор малой реки // Проблемы региональной экологии. 2020. № 1. С. 45-53. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-11045>
47. Табарин В.А., Шестаков А.В., Чжан Ю.В., Ермаков А.А., Палант А.И. Дистанционный лазерный газоанализатор нового поколения, размещаемый на беспилотном летательном аппарате // Транспорт на альтернативном топливе. 2014. № 4(40). С. 52-57.
48. Токарева О.С., Пасько О.А., Маджид С.М., Кабраль П. Мониторинг состояния растительного покрова территории центрального Ирака с использованием спутниковых данных Landsat-8 // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 6. С. 19-31. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/6/2671>
49. Топчиев А.Г. Методы и технические средства охраны окружающей среды в зоне технической ответственности предприятий нефтегазового комплекса // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 5. С. 46-53.
50. Хасанова Г.Ф. Исследования техногенных процессов в промышленных и урбанизированных территориях // Вестник науки. 2024. № 2. С. 581-585. <https://doi.org/10.24412/2712-8849-2024-271-581-585>
51. Хетагурова Э.О., Борзыкина Е.А. Исследование воздействия сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках // Вестник науки. 2021. Т. 5. № 5-1(38). С. 135-140.
52. Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Фонд космических снимков для создания карт. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2024. 115 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/SHihov-Abdullin-Fond-kosmicheskikh-snimkov-dlya-sozdaniya-kart.pdf> (дата обращения: 13.04.2025).
53. Шихов А.Н., Герасимов А.П., Пономарчук А.И., Перминова Е.С. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения Пермь: ПГНИУ, 2020. 191 с.
54. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2013. 592 с.
55. Шураков С.А., Чащин А.Н. Использование данных дистанционного зондирования Landsat 8 в оценке температурных условий в предгнездовой и гнездовой периоды озерной чайки (*Larus Ridibundus* L.) // СНВ. 2020. Т. 9. № 4. С. 184-191. <https://doi.org/10.17816/snv202094128>
56. Эльсункаева Э.В., Эзирбаев Т.Б. Мониторинг состояния окружающей среды в зонах влияния промышленных предприятий с помощью дистанционного зондирования // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 2. С. 47-52. <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.44.007>
57. Якутин М.В., Шарикалов А.Г. Экологическая обстановка на территории Муравленковского нефтегазового месторождения (Западная Сибирь, ЯНАО) по данным дистанционного зондирования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2019. Т. 24. № 4. С. 93-103. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-4-93-103>
58. Al-Shammari A., Levin E., Shults R. Oil spills detection by means of UAS and low-cost airborne thermal sensors // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. IV-5. P. 293-301. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-293-2018>
59. Banerjee B., Raval S. Mapping Sensitive Vegetation Communities in Mining Eco-space using UAV-LiDAR // International Journal of Coal Science & Technology. 2022. Vol. 9. Article Number 40 <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00509-w>
60. Buchan C., Gilroy J., Catry I., Hewson Ch., Atkinson Ph., Franco A. Combining remote sensing and tracking data to quantify species' cumulative exposure to anthropogenic change // Global Change Biology. 2023. Vol. 29. Iss. 23. P. 6679-6692 <https://doi.org/10.1111/gcb.16974>
61. Danilov A., Smirnov Ur., Pashkevich M. The System of the Ecological Monitoring of Environment which is Based on the Usage of UAV // Russian Journal of Ecology. 2015. Vol. 46. Iss. 1. P. 14-19. <https://doi.org/10.1134/S1067413615010038>
62. De Kerf T., Gladines J., Sels S., Vanlanduit S. Oil Spill Detection Using Machine Learning and Infrared Images // Remote Sensing. 2020. Vol. 12(24). Article Number 4090 <https://doi.org/10.3390/rs12244090>
63. Eccles K.M., Paul B.D., Chan H.M. The Use of Geographic Information Systems for Spatial Ecological Risk Assessments: An Example from the Athabasca Oil Sands Area in Canada // Environmental Toxicology and Chemistry. 2019. Vol. 38. Iss. 12. P. 2797-2810. <https://doi.org/10.1002/etc.4577>
64. Godfrey I., Avarð G., Brenes J.P.S., Cruz M.M., Meghraoui K. Using Sniffer4D and SnifferV portable gas detectors for UAS monitoring of degassing at the Turrialba Volcano Costa Rica // Advanced UAV. 2023. Vol. 3(1). P. 54-90.

65. Grib N., Melnikov A., Grib G., Kachaev A. Use of unmanned aerial systems for assessing the dynamics of hazardous engineering and geocryological processes on linear facilities // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 192. Article Number 04006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019204006>
66. Han H., Feng Z., Du W., Guo S., Wang P., Xu T. Remote Sensing Image Classification Based on Multi-Spectral Cross-Sensor Super-Resolution Combined With Texture Features: A Case Study in the Liaohe Planting Area // IEEE Access. 2024. Vol. 12. PP. 16830-16843. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3358812>
67. Hassani B., Sahebi M., Asiyabi R. Oil Spill Four-Class Classification Using UAVSAR Polarimetric Data // Ocean Science Journal. 2020. Vol. 55. P. 433-443. <https://doi.org/10.1007/s12601-020-0023-9>
68. Koshim A., Sergeyeva A., Yegizbayeva A. Impact of the Tengiz Oil Field on the State of Land Cover // Quaestiones Geographicae. 2022. Vol. 41. P. 83-93. <https://doi.org/10.2478/quageo-2022-0022>
69. Mani V.R.S. A Survey of Multi Sensor Satellite Image Fusion Techniques // International Journal of Sensors and Sensor Networks. 2020. Vol. 8. Iss. 1. P. 1-10 <https://doi.org/10.11648/j.jissn.20200801.11>
70. Negara T., Jaya I., Kusmana C., Mansur I., Santi N. Drone image-based parameters for assessing the vegetation condition the reclamation success in post-mining oil exploration // Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control). 2021. Vol. 19. Iss. 1. P. 105-114. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.V19I1.16663>
71. Singh A., Kushwaha S.K.P. Forest Degradation Assessment Using UAV Optical Photogrammetry and SAR Data // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2020. Vol. 49. P. 559-567. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01232-2>
72. Sniffer4D – Mobile Air Pollutant Mapping System – Drone-based Air pollutant Mapping System [Электронный ресурс]. URL: <http://sniffer4d.eu/> (дата обращения: 20.03.2025).
73. Sousa M.J., Moutinho A., Almeida M. Thermal Infrared Sensing for Near Real-Time Data-Driven Fire Detection and Monitoring Systems // Sensors. 2020. Vol. 20. Article Number 6803. <https://doi.org/10.3390/s20236803>
74. Wanasinghe T., Gosine R., Silva O., Mann G., James L., Warrian, P. Unmanned Aerial Systems for the Oil and Gas Industry: Overview, Applications, and Challenges // IEEE Access. 2020 Vol. 8. P. 166980-166997. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020593>
75. Yang L., Lei Ch., Shurui F., Yan Zh. Design of Gas Monitoring Terminal Based on Quadrotor UAV // Sensors. 2022. Vol. 22. Article Number 5350. <https://doi.org/10.3390/s22145350>
76. Zhou R., Yang C., Li E., Cai X., Yang J., Xia Y. Object-Based Wetland Vegetation Classification Using Multi-Feature Selection of Unoccupied Aerial Vehicle RGB Imagery // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Article Number 4910. <https://doi.org/10.3390/rs13234910>
77. Agibalov, A., Zaitsev, V., Sentsov, A., Poleshchuk, A. and Manuilova, E., 2021. Morphometric parameters of relief and localization of hydrocarbon deposits within the Volga-Ural anticline. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geografiya*, 4, pp. 116-128. (in Russian)
78. Anikaeva, A. and Martyushev, D., 2020. Assessment of the Unmanned Aerial Vehicle Potential Application in the Oil and Gas Industry. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 20(4), pp. 344-355. <https://doi.org/10.15593/2712-8008/2020.4.4> (in Russian)
79. Asadov, I. and Ramazanov, V., 2020. Methodology for estimating the volumes of unmolded methane burned in torches and its emission components. *Oil and Gas Business*, 5, pp. 39-51 <https://doi.org/10.17122/ogbus-2020-5-39-51> (in Russian)
80. Akhmetzyanova, L., Selivanovskaya, S. and Latypova, V., 2010. Laboratory Modeling of Oil Polluted Soil Remediation for Determination of Permissible Residual Content of Oil Products. *Scientific notes of Kazan University. Natural sciences*, 152(4), pp. 68-77. (in Russian)
81. Bredikhin, A., Eremenko, E., Kharchenko, S., Belyaev, Yu., Romanenko, F., Bolysov, S. and Fuzeina, Yu., 2020. Regionalization of the Russian Arctic according to the types of anthropogenic development and associated relief transformation by applying the cluster analysis. *Lomonosov Geography Journal*, (1), pp. 42-56. (in Russian)
82. Buzmakov, S., 2012. Antropogenic transformation of environment, *Geographical Bulletin*, (4), pp. 46-50 (in Russian)
83. Buzmakov, S., Sannikov, P., Kuchin, L., Igosheva, E. and Abdulmanova, I., 2023. The use of unmanned aerial photography for interpreting the technogenic transformation of the natural environment during the oilfield operation. *Journal of Mining Institute*, 260, pp. 180-193. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.22> (in Russian)
84. Buzmakov, S., Sannikov, P., Sivkov, D., Dziuba, E., Khotyanovskaya, Y. and Egorova, D., 2021. Development of geoinformation systems for environmental management and environmental safety in the areas of exploited oil deposits. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 7(1), pp. 102-127. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-102-127> (in Russian)
85. Buluktaev, A., 2022. Tengutinsky oil and gas field: exploring one emergency oil spill in the Chyornye Zemli Nature Reserve. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 7(3), pp. 43-51. <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-3-4> (in Russian)
86. Vasilyev, A., 2022. Analiz istochnikov zagryazneniya biosfery nefteproduktami i osobennosti ocenki ih ekologicheskogo vozdejstviya [Analysis of sources of biosphere pollution by oil products and specifics of their environmental impact assessment]. *Akademicheskij vestnik ELPIT*, 7(2), pp. 15-20. (in Russian)
87. Vasil'eva, E., 2021. Efficiency of aerial laser scanning of the territory when monitoring urban green spaces. *Interespo Geo-Siberia*, (2), pp. 31-34. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-2-31-34> (in Russian)

References

1. Abdulmanova, I. and Igosheva, E., 2021. Comparison of bog phytocenosis ecotopes parameters and peat de-

13. Glebova, L., Budanov, A. and Mikhailova, E., 2020. Development of technogenesis at the regional development of oil and gas fields in Western Siberia. *Geologiya, Geografiya i Globalnaya Energiya (Geology, Geography and Global Energy)*, 3(78), pp. 89-96. (in Russian)
14. Gordienko, A., 2021. Research of the possibility of detecting the negative impact of oil spills on the surrounding vegetation based on remote sensing data. *Vestnik SSUGT*, 26(6), pp. 48-55. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-6-48-55> (in Russian)
15. Guliev, A. and Khlebnikova, T., 2019. Revealing oil pollution spots on shelf zone with help of space survey (on the example of oil stones water area, Caspian Sea). *Vestnik SSUGT*, 24(3), pp. 52-64. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-3-52-64> (in Russian)
16. Gusev, A., 2020. Distance indicators of degrading forest geosystems in the south-east of Belarus. *Vestnik BDPU. Seryya 3. Fizika. Matematyka. Infarmatyka. Biyologiya. Geografiya*, (1), pp. 46-50. (in Russian)
17. Dvinskikh, S. and Larchenko, O., 2019. Ecological characteristic of specially protected natural area of local significance "Utinoye boloto" ("Duck swamp"), Perm. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 29(1), pp. 63-70. (in Russian)
18. Dvurechenskaya, E., 2020. Halogenesis in oligotrophic soils of the middle taiga of Western Siberia. *Geographical bulletin*, 3(54), pp. 148-158. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2020-3-148-158> (in Russian)
19. Demidov, V., 2021. LIDAR 3d laser scanning of the Prioksko-terrasny nature reserve territory for the purpose of terrain mapping, searching for areas of anthropogenic impact, vegetation structure studies. *Proceedings of the Mordovian State Nature Reserve named after P.G. Smidovich*, (28), pp. 74-82. (in Russian)
20. Ditz, L., Dudina, T., Tsuskman, E. and Katunkina, E., 2020. Geoecological problems of oil production territories. *Advances in current natural sciences*, (3), pp. 72-77. <https://doi.org/10.17513/use.37348> (in Russian)
21. Dolgoplov, D., Melkiy, V. and Verkhotur, A., 2021. Geoinformation support for safe operation of pipeline transport. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(12), pp. 52-63. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/3028> (in Russian)
22. Egorova, D., Buzmakov, S., Sannikov, P., Shestakov, I. and Khotyanovskaya, Yu., 2022. Bioremediation Potential of Natural Microbiocenosis under Conditions of Chronic Oil Contamination. *Ecology and Industry of Russia*, 26(10), pp. 60-65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-10-60-65> (in Russian)
23. Erin, A. and Khomonenko, A., 2020. Calculation of the maximum LIDAR range measurement on an unmanned aerial vehicle for object recognition tasks. *Bulletin of scientific research results*, (2), pp. 45-59. <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2020-2-45-59> (in Russian)
24. Kabanov, A., Ospangaliev, A., Kabanova, S., Kochegarov, I., Bekbaeva, A. and Danchenko, M., 2023. Application of GIS technologies in surveying the state of forest crops in the green zone of Astana. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*, 18(3), pp. 361-372. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2023-18-3-361-372>
25. Karlovich I., 2015. *Sovremennyy tekhnogenez* [Modern technogenesis]. Vladimir: VLGU publ. 165 p. (in Russian)
26. Karsakov, A. and Ponomarev, E., 2024. Remote monitoring of the thermal condition of underlying surface under the conditions of anthropogenic transformation. *Biosphere*, 16(1), pp. 20-29. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v16i1.890> (in Russian)
27. Kataev, V., 2019. Osobennosti uglevodorodnogo zagryazneniya sul'fatno-karbonatnykh karstovykh massivov [Features of hydrocarbon pollution of sulfate-carbonate karst massifs]. In: *Osipova, V., Maksimovicha, N., Baryakha, A., Buldakovo, E., Demeneva, A., Ereminoj, O., Zaikanova, V., Kataeva, V., Mamaeva, Yu. and Meshcheryakovo, O. (ed.) Sergeevskie chteniya: Materials of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology, 02-04 April 2019, Perm, Russia. Perm, PSU, pp. 309-314. (in Russian)*
28. Katkovsky, L., 2020. Calculation of objects thermal imaging parameters from unmanned aerial vehicles. *Doklady BGUIR*, 18(2), pp. 53-61. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-53-61> (in Russian)
29. Kerimov, I. and Ezirbaev, T., 2022. Experiences in the application of multispectral imagery in land cover observation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii. Geology and Geophysics of Russian South*, 12(3), pp. 182-194. <https://doi.org/10.46698/VNC.2022.58.33.001> (in Russian)
30. Maslyayev, V., Maskajkin, V., Egorova, K. and Shabaikina, V., 2022. Technogenesis as a factor in the formation of the technosphere. *Scientific review: an international scientific and practical journal*, (2). Available from: <https://srjournal.ru/2022/id363/> [Accessed 19th March 2025]. (in Russian)
31. Melkij, V. and Verkhotur, A., 2016. Geoinformacionnoe i kartograficheskoe obespechenie monitoringa dlya ocenki sostoyaniya prirodno-tekhnogennykh kompleksov Sakhalinskoj oblasti [Geoinformation and cartographic monitoring support for assessing the state of natural and man-made complexes in the Sakhalin region]. *Gecontext*, (4), pp. 30-44. (in Russian)
32. Moskovchenko, D., Babushkin, A. and Idrisov, I., 2020. Assessment of the technogenic disturbance of oil fields within the middle Ob river region, Russia, by the use of satellite imagery. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, (5), pp. 53-61. <https://doi.org/10.31857/S0869780920050069> (in Russian)
33. Myachina, K., 2019. Features of impact of oil-and-gas production objects on subzonal landscapes of the Volga-Ural steppe region. *Bulletin of the orenburg scientific center of URO RAN*, (4), pp. 21-29. <https://doi.org/10.24411/2304-9081-2019-15021> (in Russian)
34. Novokhatin, V. and Osipova, N., 2021. Space monitoring of emergency oil spills within license areas in Western Siberia. *Moscow Economic Journal*, (3), pp. 57-63 (in Russian)

35. Ovchinnikova, N. and Medvedkov, D., 2019. The use of unmanned aerial vehicles for land management, cadastre and urban planning. *Economy and ecology of territorial formations*, 3(1), pp. 98-108. <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-1-98-108> (in Russian)
36. Ostroukhov, A., Klimina, E. and Kuptsova, V., 2020. Landscape mapping of hard-to-reach areas. A case study for the Bolonsky state nature reserve (Russia). *Nature Conservation Research*, 5(2), pp. 47-63. <https://doi.org/10.24189/ncr.2020.015> (in Russian)
37. Peremitina, T. and Yashchenko, I., 2018. Evaluating the dynamics of vegetation of oil-extracting territories in western Siberia based on vegetation NDVI indices. *Interexpo Geo-Siberia*, (4), pp. 154-163. (in Russian)
38. Prokhorov, A. and Noskov, I. 2022. Monitoring of main oil and gas pipelines using UAVs. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(6). Available from: <https://esj.today/PDF/40NZVN622.pdf> [Accessed 20th March 2025]. (in Russian)
39. Razakova, M., 2017. Identification and mapping of oil contamination of soils using remote sensing data. *Problems of Informatics*, (4), pp. 4-15. (in Russian)
40. Reijmers, N., 1990. *Prirodopolzovanie* [Environmental management]. Moscow: Mysl publ. 637 p. (in Russian)
41. Rustamov, Z. and Bryukhova, K., 2019. The problem of associated oil gas utilization, analysis and current status. *Bulletin of PNIPU. Aerospace engineering*, (58), pp. 102-109. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2019.58.08> (in Russian)
42. Sannikov, P., Andreev, D. and Buzmakov, S., 2018. Identification and analysis of deadwood using an unmanned aerial vehicle. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 15(3), pp. 103-113. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113> (in Russian)
43. Sokolov, A., 2020. Geoecological conditions of influence on soil resources, in the territory of oil deposit of Tomsk region. *Moscow Economic Journal*, (6), pp. 20-29. (in Russian)
44. Solntseva, N., 1998. *Dобыча нефти и геохимия природных ландшафтов* [Oil production and geochemistry of natural landscapes]. Moscow: Publishing House of Moscow University. 376 p. (in Russian)
45. Soromotin, A., 2011. Ecological Consequences of Different Stages of the Development of Oil and Gas Deposits in the Taiga Zone of the Tyumen Region. *Contemporary Problems of Ecology*, 18(6), pp. 813-822. (in Russian)
46. Soromotin, A., Kazantseva, M., Kremleva, T., Elizarova, D., Brodt, L. and Fefilov, N., 2020. Technogenic halogenesis of surface waters and vegetation communities as a result of mineral water discharge into a minor river water catchment area. *Problems of regional ecology*, (1), pp. 45-53. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-11045> (in Russian)
47. Tabarin, V., Shestakov, A., Zhang, Yu., Ermakov, A. and Palant, A., 2014. Distancionnyj lazernyj gazoanalizator novogo pokoleniya, razmeshchaemyj na bespilotnom letatel'nom apparate [Remote laser gas analyzer of a new generation placed on an unmanned aerial vehicle]. *Alternative fuel transport*, 4(40), pp. 52-57. (in Russian)
48. Tokareva, O., Pasko, O., Majid, S. and Cabral, P., 2020. Monitoring vegetation state in the central Iraq using Landsat-8 satellite data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 331(6), pp. 19-31. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/6/2671> (in Russian)
49. Topchiev, A., 2014. Metody i tekhnicheskie sredstva okhrany okruzhayushchej sredy v zone tekhnicheskoy otvetstvennosti predpriyatij neftegazovogo kompleksa [Methods and technical means of environmental protection in the area of technical responsibility of enterprises of the oil and gas complex]. *Environmental protection in the oil and gas complex*, (5), pp. 46-53. (in Russian)
50. Khasanova, G., 2024. Studies of technogenic processes in industrial and urbanized territories. *Bulletin of science*, 1(2), pp. 581-585. <https://doi.org/10.24412/2712-8849-2024-271-581-585> (in Russian)
51. Khetagurova, E. and Borzykina, E., 2021. Study of the impact of combustion associated petroleum gas on torch plants. *Bulletin of science*, 5(5), pp. 135-140. (in Russian)
52. Shikhov, A., Gerasimov, A., Ponarchuk, A. and Perminova, E., 2020. *Tematicheskoe deshifirovanie i interpretaciya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya* [Thematic decoding and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution]. Perm, PSU. 191 p. (in Russian)
53. Shikhov, A. and Abdullin, R., 2024. *Fond kosmicheskikh snimkov dlya sozdaniya kar* [The Satellite Imagery Fund for creating maps]. Perm. 115 p. Available from: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/SHihov-Abdullin-Fond-kosmicheskikh-snimkov-dlya-sozdaniya-kart.pdf> [Accessed 13th March 2025]. (in Russian)
54. Schowengerdt, R., 2010. *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. Moscow, Thnosphere. 560 p. (in Russian)
55. Shurakov, S. and Chashchin, A., 2020. The use of Landsat 8 remote sensing data for assessing the temperature conditions of the *Larus ridibundus* L. habitat. *Samara Journal of Science*, 9(4), pp. 184-191. <https://doi.org/10.17816/snv202094128> (in Russian)
56. Elsunkaeva, E. and Ezirbaev, T., 2020. Environmental monitoring in the industrial areas by remote sensing in order to identify the risk of pollution. *Monitoring. Science and Technology*, (2), pp. 47-52. <https://doi.org/10.25714/MNT.2020.44.007> (in Russian)
57. Yakutin, M. and Sharikalov, A., 2019. Ecological situation on the territory of Muravlenko oil field (Western Siberia, YANAO) based on remote sensing data. *Vestnik SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 24(4), pp. 93-103. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-4-93-103> (in Russian)
58. Al-Shammari, A., Levin, E. and Shults, R., 2018. Oil spills detection by means of UAS and low-cost airborne thermal sensors. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, pp. 293-301. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-293-2018>
59. Banerjee, B. and Raval, S., 2022. Mapping Sensitive Vegetation Communities in Mining Eco-space using UAV-LiDAR. *International Journal of Coal Science &*

Technology, 9, Article Number 40.
<https://doi.org/10.1007/s40789-022-00509-w>

60. Buchan, C., Gilroy, J., Catry, I., Hewson, Ch., Atkinson, Ph. and Franco, A., 2023. Combining remote sensing and tracking data to quantify species' cumulative exposure to anthropogenic change. *Global Change Biology*, 29(23), pp. 6679-6692 <https://doi.org/10.1111/gcb.16974>

61. Danilov, A., Smirnov, Ur. and Pashkevich, M., 2015. The System of the Ecological Monitoring of Environment which is Based on the Usage of UAV. *Russian Journal of Ecology*, 46(1), pp. 14-19.
<https://doi.org/10.1134/S1067413615010038>

62. Kerf, T., Gladines, J., Sels, S. and Vanlanduit, S., 2020. Oil Spill Detection Using Machine Learning and Infrared Images. *Remote Sensing*, 12(24), Article Number 4090. <https://doi.org/10.3390/rs12244090>

63. Eccles, K., Paul, B. and Chan, H., 2019. The Use of Geographic Information Systems for Spatial Ecological Risk Assessments: An Example from the Athabasca Oil Sands Area in Canada. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(12), pp. 2797-2810. <https://doi.org/10.1002/etc.4577>

64. Godfrey, I., Avard, G., Brenes, J., Cruz, M. and Mehraoui, K., 2023. Using Sniffer4D and SnifferV portable gas detectors for UAS monitoring of degassing at the Turrialba Volcano Costa Rica. *Advanced UAV*, 3(1), pp. 54-90.

65. Grib, N., Melnikov, A., Grib, G. and Kachaev, A., 2020. Use of unmanned aerial systems for assessing the dynamics of hazardous engineering and geocryological processes on linear facilities. *E3S Web of Conferences*, 192, Article Number 04006.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019204006>

66. Han, H., Feng, Z., Du, W., Guo, S., Wang, P. and Xu, T., 2024. Remote Sensing Image Classification Based on Multi-Spectral Cross-Sensor Super-Resolution Combined With Texture Features: A Case Study in the Liaohe Planting Area. *IEEE Access*, 12, pp. 16830-16843.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3358812>

67. Hassani, B., Sahebi, M. and Asiyabi, R., 2020. Oil Spill Four-Class Classification Using UAVSAR Polarimetric Data. *Ocean Science Journal*, 55, pp. 433-443.
<https://doi.org/10.1007/s12601-020-0023-9>

68. Koshim, A., Sergeyeva, A. and Yegizbayeva, A., 2022. Impact of the Tengiz Oil Field on the State of Land Cover. *Quaestiones Geographicae*, 41, pp. 83-93.
<https://doi.org/10.2478/quageo-2022-0022>

69. Mani, V., 2020. A Survey of Multi Sensor Satellite Image Fusion Techniques. *International Journal of Sensors and Sensor Networks*, 8(1), pp. 1-10
<https://doi.org/10.11648/j.ijssn.20200801.11>

70. Negara, T., Jaya, I., Kusmana, C., Mansur, I. and Santi, N., 2021. Drone image-based parameters for assessing the vegetation condition the reclamation success in post-mining oil exploration. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 19(1), pp. 105-114. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.V19I1.16663>

71. Singh, A. and Kushwaha, S., 2020. Forest Degradation Assessment Using UAV Optical Photogrammetry and SAR Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, pp. 559-567. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01232-2>

72. Sniffer4D – Mobile Air Pollutant Mapping System – Drone-based Air pollutant Mapping System. Available from: <http://sniffer4d.eu/> [Accessed 20th March 2025].

73. Sousa, M., Moutinho, A. and Almeida, M., 2020. Thermal Infrared Sensing for Near Real-Time Data Driven Fire Detection and Monitoring Systems. *Sensors*, 20, Article Number 6803. <https://doi.org/10.3390/s20236803>

74. Wanasinghe, T., Gosine, R., Silva, O., Mann, G., James, L. and Warrian, P., 2020. Unmanned Aerial Systems for the Oil and Gas Industry: Overview, Applications, and Challenges. *IEEE Access*, 8, pp. 166980-166997.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020593>

75. Yang, L., Lei, Ch., Shurui, F. and Yan, Zh., 2022. Design of Gas Monitoring Terminal Based on Quadrotor UAV. *Sensors*, 22, Article Number 5350.
<https://doi.org/10.3390/s22145350>

76. Zhou, R., Yang, C., Li, E., Cai, X., Yang, J. and Xia, Y., 2021. Object-Based Wetland Vegetation Classification Using Multi-Feature Selection of Unoccupied Aerial Vehicle RGB Imagery. *Remote Sensing*, 13, Article Number 4910. <https://doi.org/10.3390/rs13234910>

Статья поступила в редакцию 21.01.2025; одобрена после рецензирования 07.05.2025; принята к публикации 16.05.2025.

The article was submitted 21.01.2025; approved after reviewing 07.05.2025; accepted for publication 16.05.2025.