

Т. О. Перемитина¹✉, И. Г. Яценко¹

Геоэкологический мониторинг растительности арктических углеводородных территорий с использованием спутниковых данных

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти
Сибирского отделения Российской академии наук (ИХН СО РАН),
г. Томск, Российская Федерация
e-mail: peremitinat@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование экологической обстановки нефтегазодобывающих регионов Западной Сибири с акцентом на оценку состояния растительного покрова. В работе представлены результаты многолетнего мониторинга улучшенного вегетационного индекса (Enhanced Vegetation Index, EVI) для анализа динамики восстановления растительных сообществ на территориях месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа. На основе обработки спутниковых данных MODIS с средним пространственным разрешением выполнены расчеты усредненных значений EVI за вегетационные сезоны 2013–2024 годов (период наблюдений с 25 мая по 20 сентября). Проведенные расчеты демонстрируют стабильный рост показателей: за период с 2013 по 2024 год средние значения вегетационного индекса увеличились на 10,6 %, что является объективным свидетельством улучшения состояния растительных сообществ. Наиболее выраженный прирост индекса EVI наблюдается в конце вегетационного периода, что может быть связано с активизацией процессов естественной регенерации растительности и общим улучшением экологических условий на исследуемых участках.

Ключевые слова: углеводородные месторождения, космические снимки, улучшенный вегетационный индекс, биота

T. O. Peremitina¹✉, I. G. Yashchenko¹

Geoecological monitoring of vegetation in arctic hydrocarbon territories using satellite data

¹Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Tomsk, Russian Federation
e-mail: peremitinat@mail.ru

Abstract. The environmental conditions of oil and gas extraction regions in Western Siberia have been examined, with particular focus on the state of vegetative cover. This study presents findings from long-term monitoring of the Enhanced Vegetation Index (EVI), utilized to assess the regeneration dynamics of plant communities within the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug fields. By processing MODIS satellite data at moderate spatial resolution, mean EVI values were calculated for each growing season from 2013 to 2024, covering the observation period from May 25th to September 20th. The results indicate a consistent upward trend: over the analyzed span, average EVI values rose by 10.6%, providing clear evidence of enhanced vegetative health in these areas. Notably, the most significant increases in EVI were observed toward the end of the growing season, which may be attributed to intensified natural recovery processes and overall improvements in environmental conditions across the regions under study.

Keywords: hydrocarbon fields, satellite imagery, enhanced vegetation index, biota

Введение

Нефть и продукты ее переработки оказывают серьезное негативное воздействие на природные системы, причем вторичные соединения, образующиеся в процессе ее разложения, зачастую еще опаснее для живых организмов. Однако зависимость мировой экономики от углеводородного сырья не позволяет существенно снизить масштабы его извлечения из недр. На всех этапах нефтяного цикла – от добычи до перевозки и переработки – происходят аварийные ситуации, приводящие к выбросам нефтепродуктов. По данным экологов, от 30 до 50 % случаев загрязнения связаны с ошибками персонала, а 20–40 % – с износом или поломкой техники. В арктических широтах вероятность таких инцидентов возрастает из-за суровых климатических условий, которые усложняют эксплуатацию инфраструктуры.

Настоящая работа направлена на долгосрочный мониторинг экологической обстановки в районах нефтегазовых месторождений, расположенных за Полярным кругом. В качестве основного маркера состояния природной среды рассматривается растительность, поскольку она чутко реагирует на любые изменения, вызванные как деятельностью человека, так и естественными процессами.

Объект исследования

Изучение проводилось на территории Ямало-Ненецкого автономного округа, где расположены Вынгайхинское, Губкинское, Комсомольское и Тарасовское месторождения (рис. 1). Эти участки входят в состав Пуровского района, площадь которого превышает 102 тыс. км², а протяженность с севера на юг составляет около 720 км.

Регион отличается разнообразием ландшафтов: на севере преобладают редкостойные леса с лиственницей, елью и кедром, а южнее распространены лишайниковые боры с березами и соснами. Особенностью местности являются обширные мохово-лишайниковые болота, а также пойменные лугово-ивовые сообщества вдоль крупных рек. На Вынгайхинском и Комсомольском месторождениях значительные площади заняты сосновыми лесами с преобладанием кустистых лишайников.



Рис. 1. Исследуемые территории углеводородных месторождений ЯНАО
1 Губкинское, 2 Вынгайхинское, 3 Комсомольское, 4 Тарасовское

Согласно официальной статистике, предоставленной Департаментом охраны окружающей среды и природопользования Ямало-Ненецкого автономного округа [1], основным источником загрязнения экосистем региона выступают отходы, образующиеся при добыче минеральных ресурсов. Анализ данных (табл. 1) демонстрирует устойчивый рост количества таких отходов в течение рассматриваемого периода.

Особенно выделяется 2020 год, где зафиксирован резкий скачок показателей, что, по-видимому, обусловлено изменениями в производственных процессах из-за ограничений, введенных во время пандемии коронавируса. Однако уже в 2022 году ситуация кардинально изменилась: объемы отходов, отправленных на захоронение или временное хранение, существенно сократились, тогда как доля утилизированных отходов заметно возросла. Это указывает на улучшение системы обращения с отходами в регионе.

Наиболее значительный прогресс наблюдается в 2023 году – почти 70 % всех образовавшихся отходов были переработаны и вовлечены в повторное использование. Такой результат во многом обеспечен деятельностью нефтегазовых компаний, активно внедряющих технологии утилизации буровых отходов.

Таблица 1

Сведения об образовании, утилизации, обезвреживании и размещении отходов производства и потребления по Ямало-Ненеckому а.о. за 2013-2024 гг.

Год	Количество образовавшихся отходов (тыс. т)	Количество утилизированных отходов (тыс. т)	Количество обезвреженных отходов (тыс. т)	Количество размещенных отходов (тыс. т)
2013	652,20	291,9	290,3	329,2
2014	625,20	216,5	569,5	292,3
2015	635,60	331,6	362,4	196,1
2017	930,40	446,9	48,0	138,3
2018	939,40	721,3	21,6	171,6
2019	1729,00	1350,6	123,4	190,0
2020	487,70	464,5	48,7	193,7
2021	1882,97	1645,4	42,3	223,5
2022	2593,77	2157,9	70,9	75,5
2023	2744,50	1900,4	75,1	474,8

Особенности арктических нефтегазовых месторождений, включая экстремальные климатические условия, труднодоступность территорий, повышенную чувствительность природных комплексов и замедленные темпы регенерации флоры после антропогенного воздействия, обуславливают необходимость регулярного мониторинга состояния растительности. В этом контексте особую актуальность приобретает исследование трансформаций растительного покрова на

территории Ямало-Ненецкого АО с применением общедоступных материалов космической съемки.

Методы и материалы

В ходе исследования для мониторинга состояния растительных сообществ в районах нефтегазодобычи были задействованы данные, полученные спектро-радиометром MODIS космического аппарата Terra.

В соответствии с нормативным документом Рослесхоза (№ 472 от 10.11.2011 в редакции от 15.03.2018) [2], временные границы вегетационного сезона для территории ЯНАО определены с 1 июня по 1 октября, что составляет 122 дня. Для анализа выбраны восемь 16-дневных композитных снимков MOD13Q1 [3] (табл. 2). Такой временной охват позволяет наиболее точно отследить динамику растительного покрова в течение всего периода активной вегетации.

Таблица 2

Перечень используемых композитов MOD13Q1 за период 2013–2024 гг.

Идентификатор композита	Период 16-дневного интервала
145	10 июня – 25 июня
161	26 июня – 7 июля
177	7 июля – 27 июля
193	28 июля – 12 августа
209	13 августа – 28 августа
225	29 августа – 13 сентября
241	14 сентября – 20 сентября
257	10 июня – 25 июня

В более ранних научных работах [4] авторами были детально проанализированы методологические подходы к отслеживанию динамики растительных сообществ на территориях нефтегазовых месторождений с применением различных вегетационных показателей. Особое внимание уделялось возможностям этих индексов в оценке продуктивности фитоценозов и определении запасов органической массы [5].

В рамках текущего исследования был выбран усовершенствованный вегетационный индекс (Enhanced Vegetation Index, EVI), обладающий рядом преимуществ для анализа трансформации растительного покрова. Основное достоинство данного показателя заключается в его меньшей зависимости от фоновых помех, связанных с почвенным покровом и атмосферными условиями.

Шкала значений EVI охватывает диапазон от -1 до 1, обеспечивая высокую точность соответствия между расчетными показателями и фактическим состоянием растительных сообществ. Согласно имеющимся данным [6], для нормально развивающихся растительных ассоциаций Ямало-Ненецкого региона типичны значения индекса в пределах 0,2–0,4, что свидетельствует об их удовлетворительном физиологическом состоянии.

Результаты и обсуждение

В рамках исследования проведен комплексный анализ динамики растительности на территории нефтегазовых месторождений с использованием современных ГИС-технологий. Для обработки данных применялся ArcGIS версии 10.8. На первом этапе работы в геоинформационной системе созданы векторные полигоны, точно соответствующие границам четырех исследуемых углеводородных месторождений (рис. 1).

Основу анализа составили спутниковые снимки MOD13Q1, охватывающие период с 2013 по 2024 год, с информацией об индексе вегетации EVI (Enhanced Vegetation Index). Процесс обработки данных включал применение инструмента зональной статистики, который позволяет рассчитывать средние значения вегетационного индекса для заданных территориальных единиц. Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 2, где четко прослеживается динамика изменения средних значений индекса EVI за весь период наблюдений. Такой подход позволил получить объективную оценку состояния растительного покрова и его изменений под влиянием природных и антропогенных факторов.

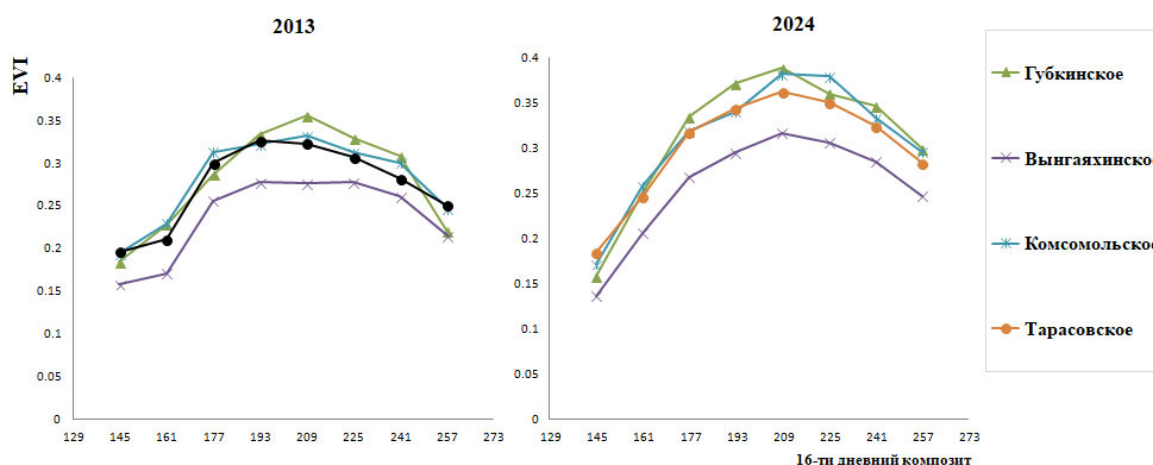


Рис. 2. Динамика изменения средних значений индекса EVI вегетационных периодов 2013–2024 гг.

В начале вегетационного периода (145-й композит) 2013 года растительный покров четырех месторождений углеводородов характеризовался относительно низкими значениями индекса EVI, которые не превышали 0,1961 при минимальном показателе 0,1184. Спустя десятилетие, в 2024 году, диапазон изменился незначительно – от 0,1367 до 0,1856. Несмотря на сокращение верхней границы, средний уровень индекса продемонстрировал рост примерно на 2,5 %, что может указывать на постепенную стабилизацию растительных сообществ.

К концу вегетационного сезона (257-й композит) различия между годами стали более выраженными. Если в 2013 году EVI колебался в пределах 0,2145–0,2504, то к 2024 году его значения существенно увеличились, достигнув 0,2474–

0,2998. Такой прирост (в среднем 17,7 %) свидетельствует о восстановительных процессах в экосистемах, вероятно, связанных с изменением антропогенной нагрузки или естественными сукцессионными изменениями.

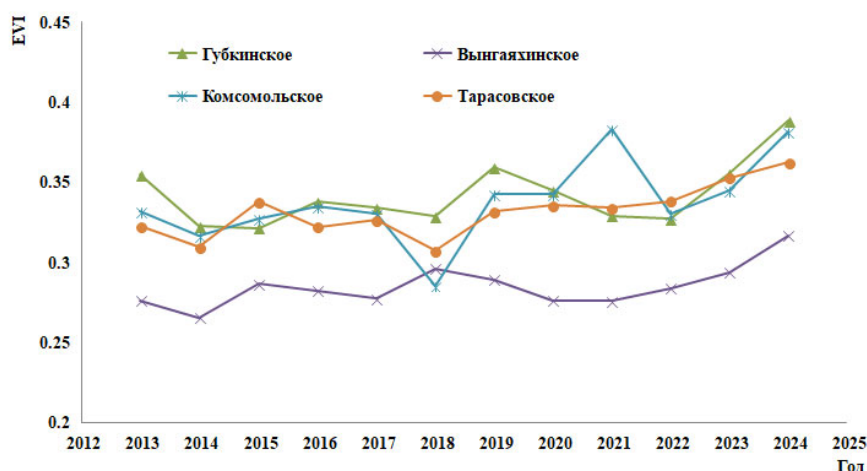


Рис. 3. Динамика изменения средних значений индекса EVI с 28 июля – 12 августа (209-й композит)

Результаты указывают на увеличение продолжительности вегетационного сезона растительных сообществ. Данная тенденция, вероятно, обусловлена глобальными климатическими изменениями, в частности устойчивым повышением температурного фона, наблюдаемым в течение последних десяти лет.

Исследование включало оценку изменений индекса растительности EVI на стадии пиковой вегетации (с 28 июля по 12 августа) за одиннадцатилетний период наблюдений с 2013 по 2024 год. Полученные данные охватывают четыре контрольных участка углеводородных месторождений (рис. 3). Анализ среднегодовых показателей EVI в период максимального развития растительности (рис. 3) выявил сходные закономерности на всех изучаемых территориях. Наибольшие величины индекса зафиксированы в 2013, 2019 и 2024 годах, тогда как самые низкие значения характерны для 2014 и 2018 годов.

Среди всех изученных объектов наиболее показательным оказалось Вынгаяхинское месторождение. На протяжении всего периода наблюдений здесь регистрировались минимальные показатели вегетационного индекса EVI, варьирующиеся в диапазоне 0,2657–0,3169. Такие особенности обусловлены спецификой местного ландшафта, для которого характерны обширные заболоченные площади с преобладанием травянистой растительности, кустарничково-моховых сообществ и многочисленных мелководных озерных образований. Примечательно, что в 2024 году на данном участке отмечен значительный подъем индекса EVI до максимального значения 0,3169, что может рассматриваться как индикатор улучшения состояния растительных сообществ. Полученные данные

позволяют говорить о формировании устойчивой положительной динамики в восстановлении природных комплексов на территориях нефтегазодобычи.

Проведенный анализ данных по обращению с отходами производства и потребления в Ямало-Ненецком автономном округе (табл. 1) в сопоставлении с динамикой вегетационного индекса EVI выявил интересную закономерность. В периоды повышенного образования отходов (2019, 2021, 2022 гг.) растительные сообщества демонстрировали стабильно высокие показатели EVI, свидетельствующие об их хорошем состоянии. В то же время годы со сниженными значениями индекса (2014, 2018 гг.) соответствовали периодам с умеренным или пониженным объемом отходов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об отсутствии выраженной отрицательной корреляции между количеством образующихся отходов и состоянием растительного покрова. Вероятно, существующая система утилизации и обезвреживания отходов достаточно эффективно минимизирует их потенциальное негативное воздействие на окружающие экосистемы.

Заключение

Проведенный анализ спутниковых данных подтвердил, что применение вегетационного индекса EVI является эффективным инструментом для мониторинга динамики растительного покрова в условиях арктических нефтегазовых месторождений, демонстрируя не только текущее состояние экосистем, но и их многолетние изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. Сравнительный анализ данных выявил устойчивую положительную динамику: в 2024 году средние значения индекса превысили базовый уровень 2013 года на 10,6 %.

Проведенные исследования подтвердили эффективность использования спутникового мониторинга для количественной оценки экологического статуса труднодоступных арктических территорий. Полученные результаты имеют значительную практическую ценность для организации системы экологического контроля и управления в условиях Крайнего Севера. *Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031500046-7).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Доклад об экологической ситуации в Ямало-Ненецком автономном округе в 2023 году [Электронный ресурс]. URL: <https://dpr.yanao.ru/documents/other/357052/> (дата обращения: 13.05.2025).
2. Приказ Рослесхоза от 10.11.2011 № 472 (ред. от 15.03.2018) «Об утверждении Методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов» // <https://legalacts.ru/doc/prikaz-rosleskhoza-ot-10112011-n-472-ob/> (дата обращения: 14.05.2025)
3. Официальный сайт радиометра MODIS: описание системы TERRA и сканера MODIS [Электронный ресурс]. URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov>. (дата обращения: 13.05.2025)
4. Пространственно временная динамика вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index) в разных типах ландшафтов Брянской области / Г. В. Лобанов, А. Ф. Зайцева,

А. В. Полякова [и др.] // Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований. – 2012. – № 3(3). – С. 46–52.

5. Перемитина Т.О., Яценко И. Г. Применение спутниковых данных terra-modis для мониторинга состояния растительного покрова нефтедобывающих территорий Томской области // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sputnikovyh-dannyh-terra-modis-dlya-monitoringa-sostoyaniya-rastitelnogo-pokrova-neftedobyvayuschih-territoriy-tomskoj> (дата обращения: 14.05.2025).

6. Перемитина Т. О., Яценко И. Г. Анализ состояния растительного покрова нефтедобывающих комплексов Томской области // Химия в интересах устойчивого развития. – 2020. – Т. 28, № 3. – С. 288–293.

© Т. О. Перемитина, И. Г. Яценко, 2025