

УДК 504.064

## Диагностика состояния нефтедобывающих территорий арктической зоны с применением спутниковых данных

А.В. Яценко, Т.О. Перемитина, И.Г. Яценко✉\*

*Институт химии нефти СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 4*

Поступила в редакцию 16.02.2022 г.;

после доработки 7.04.2022 г.;

принята к печати 11.04.2022 г.

Рассмотрены вопросы применения спутниковых данных MODIS для диагностики состояния нефтедобывающих арктических территорий. Исследовано состояние растительного покрова углеводородных месторождений Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа: Восточно-Таркосалинского, Вынгайхинского и Тарасовского, за период 2013–2020 гг. По спутниковым данным Terra/MODIS средствами геоинформационной системы ArcGis проведен расчет средних значений вегетационного индекса EVI для исследуемых территорий. Построены карты техногенной нагрузки нефтегазового комплекса.

*Ключевые слова:* арктические территории, спутниковые данные, вегетационный индекс, геоинформационные системы, растительный покров, углеводородное месторождение; arctic territories, satellite data, vegetation index, geoinformation system, vegetation cover, hydrocarbon deposits.

### Введение

Вопросы экологической безопасности Арктики имеют особое значение ввиду повышенной уязвимости окружающей среды и интенсивного освоения природных ресурсов северных регионов [1]. Многочисленные исследования российских и зарубежных ученых показывают, что уровни загрязнения арктических территорий пока невысоки по сравнению с другими регионами, но антропогенная нагрузка на окружающую среду в высоких широтах постоянно увеличивается в связи с развитием хозяйственной деятельности в арктической зоне, в том числе на континентальном шельфе.

На предприятиях добычи, хранения и транспортировки нефти, газа и нефтепродуктов обычно случаются безвозвратные потери, обусловленные утечками, разливами, прорывами и авариями, что приводит к загрязнению окружающей среды [2]. Значительный потенциал использования спутниковых данных в задачах мониторинга растительного покрова к настоящему времени продемонстрирован результатами ряда исследований [3–7]. Различия коэффициентов спектральной яркости растений и их частей обусловлены составом и состоянием пигментов растительных и покровных тканей, морфологией растения в целом, возрастом, экологическими условиями [8, 9]. С начала 2000-х гг. спутниковые данные активно используются для изучения со-

стояния растительного покрова разных природных зон [2, 10, 11]. С другой стороны, все четче намечается тенденция применения для мониторинга состояния растительного покрова не исходных снимков, а продуктов, получаемых на их основе, которые представляют собой изображения вегетационных индексов [2, 12–14].

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных диапазонов длин волн. Знания о связи структуры и состояния растительности с ее спектральной отражательной способностью позволяют использовать спутниковые данные для картографирования и идентификации типов растительности и их стрессового состояния [15].

В связи с вышесказанным один из эффективных способов оценки состояния растительного покрова арктических территорий – использование мультиспектральных снимков и расчет вегетационных индексов. Так, в некоторых публикациях [1, 16–18] сделан вывод о современной реакции тундровых экосистем России на изменение климата – это «позеленение» тундры, например на о-вах Баренцева моря [1] и на п-ве Ямал [16–18]. Также в этих публикациях показано, что получаемые со спутников изображения земной поверхности свидетельствуют о возрастании за последние десятилетия усредненного значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), отражающего степень «позеленения» территории, что связывают с увеличением фитомассы растительности в условиях увеличения продолжительности вегетационного периода.

\* Анастасия Вячеславовна Яценко (yav-vgtrk@yandex.ru); Татьяна Олеговна Перемитина (pto@ipc.tsc.ru); Ирина Германовна Яценко (sric@ipc.tsc.ru).

Цель настоящей работы заключается в применении спутниковых данных для диагностики и оценки состояния растительности техногенно-нарушенных нефтедобывающих арктических территорий. Диагностика и анализ состояния исследуемых территорий предполагает применение ранее разработанной методики [19, 20] количественной оценки состояния растительного покрова на основе значений вегетационных индексов спутниковых данных MODIS за период техногенного воздействия нефтегазодобывающих предприятий на территориях месторождений Пу ровского района Ямало-Ненецкого автономного округа с 2013 по 2020 г.

### Объект исследования

Объект исследования в настоящей работе – растительный покров территории углеводородных арктических месторождений: Восточно-Таркосалинское (открыто в 1971 г.), Вынгайхинское (открыто в 1968 г.) и Тарасовское (открыто в 1984 г.). Месторождения по своим запасам являются крупными и находятся относительно близко друг к другу на территории Пу ровского района Ямало-Ненецкого автономного округа (рис. 1). В этом районе развиты транспортная инфраструктура (преобладают бетонные дороги, есть железнодорожная магистраль), сеть коммуникаций и трубопроводный транспорт [21–23]. Территория отличается высокой заболоченностью, вызванной наличием мощного слоя мерзлоты, которая выступает в роли водораздела.

### Материалы и методы

*Построение индексных изображений.* На космическом снимке каждый пиксель изображения –

это интенсивность отраженного света для определенных диапазонов длин волн. Расчет вегетационного индекса NDVI основан на разнице отражения в ближней инфракрасной области электромагнитного спектра и в красной части спектра [25].

В настоящей работе применена разработанная ранее методика [19, 20] оценки состояния растительного покрова по спутниковым данным MODIS – 16-дневным композитам с пространственным разрешением 250 м, содержащим значения нормированного разностного вегетационного индекса NDVI и улучшенного вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index).

Индекс NDVI рассчитывается по формуле

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{nir}$  – спектральная яркость поверхности в ближнем инфракрасном диапазоне;  $\rho_{red}$  – в красном диапазоне.

Индекс может принимать значения от –1 до 1. Области без растительности (бесплодная земля, скалы, песок, техногенно-нарушенный ландшафт) характеризуются очень низкими значениями  $NDVI < 0,1$ ; в районах разреженной растительности на болотистой местности (кустарники и травы)  $NDVI = 0,2–0,4$ ; у деревьев во время их пиковой стадии роста самый высокий диапазон  $NDVI = 0,5–0,9$ ; значения  $NDVI$  у воды отрицательные.

В нашей работе важно проводить более точный расчет индексов, так как арктическая растительность отличается разреженностью, низкой фитомассой из-за критических климатических условий. Поэтому при получении снимков возникает необходимость выбора более эффективных индексов, чтобы учесть влияние интенсивности света, атмосферных



Рис. 1. Исследуемые территории углеводородных месторождений (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.06>)

условий, заболоченности территории и характеристик датчика.

Как отмечается в работах многих авторов, NDVI чувствителен к фоновому отражению, что ограничивает использование этого индекса [19, 20]. В качестве альтернативы NDVI существует усовершенствованный вегетационный индекс EVI, в расчетах которого учитываются значения спектральной яркости поверхности в синем диапазоне длин волн, при этом влияние почвы и атмосферы в значениях этого индекса минимизировано. Расчет EVI выполняется по формуле

$$EVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{(\rho_{nir} + C_1)(\rho_{red} - C_2)(\rho_{blue} + L)}(1 + L), \quad (2)$$

где  $\rho_{blue}$  – спектральная яркость поверхности в синем диапазоне;  $L$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы;  $C_1, C_2$  – коэффициенты аэрозольной устойчивости, использующие синий канал для коррекции аэрозольного влияния в красном канале. Диапазон значений индекса от  $-1$  до  $1$ ; для зеленой растительности  $EVI = 0,2-0,8$ .

Для достижения целей исследования работа выполнялась в несколько этапов:

- формирование и предварительная обработка многолетней серии изображений MOD13Q1 в период с 2013 по 2020 г., покрывающих территорию исследований;
- формирование выборки месторождений и создание их векторной картографической основы;
- вычисление многолетнего ряда EVI для каждого выбранного месторождения и территории Пуровского района в целом;
- статистический анализ значений EVI;
- расчет показателей техногенной нагрузки на окружающую среду месторождений.

На первом этапе была сформирована коллекция космических снимков MODIS с изображениями данных MOD13Q1 [26]. На каждый год на всю территорию Пуровского района отбирали данные с 12 июля (193 день в году) по 27 июля – пик вегетационного периода. Основным ограничением применения данных MOD13Q1 является их невысокое пространственное разрешение – 250 м/пиксель. В нашем случае объекты исследования позволяют пренебречь этим ограничением.

*Обработка информации средствами ГИС.* Геопространственный анализ состояния растительного покрова и оценка техногенной нагрузки по данным дистанционного зондирования для территорий месторождений проводилась с помощью геоинформационной системы ArcGIS 10.8. Программный пакет ArcGIS полностью удовлетворяет поставленным задачам определения характеристик растительности на основе материалов дистанционного зондирования, извлечения данных из индексных изображений и построения картосхем. ArcGIS позволяет выполнить полный объем экспериментальных работ по ГИС-анализу результатов тематической обработки спутниковых данных, получить картографическую информацию и данные статистического анализа.

## Результаты исследования

Расчет индекса EVI выполнен наложением векторных полигональных слоев территорий Пуровского района и углеводородных месторождений на разновременные спутниковые снимки MOD13Q1 с информацией об индексе EVI.

Проанализированы средние значения EVI за 12–27 июля в целом для Пуровского района (таблица). Видно, что индексы в среднем изменяются от минимального значения 0,324 в 2014 г. до максимального 0,348 в 2020 г. Рост индекса EVI составил за 8-летний период в среднем 7,4%, что не противоречит данным работы [16]: «С конца 1980-х гг. по настоящее (2015 г.) время выявлено “позеленение” Арктики, а рост максимальных значений NDVI составил 15%». Как сказано выше, на увеличение доли травяного, кустарникового и древесного покрытия влияют рост продолжительности вегетации, сумма активных температур и глубина оттаивания верхних слоев почвы в регионах распространения вечной мерзлоты.

Средние значения индекса EVI с 12 по 27 июля, полученные для Пуровского района

Год							
2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
0,335	0,324	0,332	0,344	0,331	0,340	0,344	0,348

Преобразование арктических территорий может быть оценено путем сравнения разногодичных данных дистанционного мониторинга и трендов изменения EVI на антропогенно нарушенных территориях. На рис. 2 представлены результаты расчетов средних значений индекса EVI за 12–27 июля с 2013 по 2020 г. для территорий исследуемых месторождений.

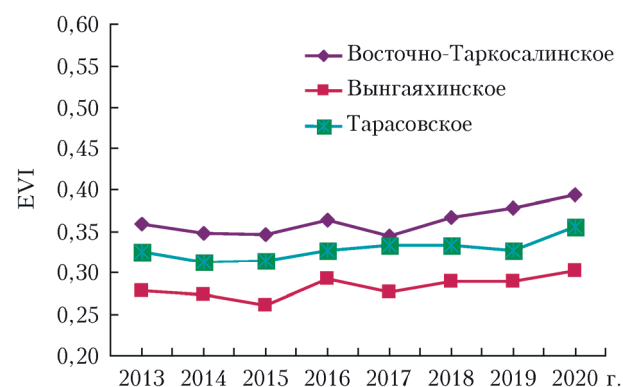


Рис. 2. Динамика изменения индекса EVI на исследуемых месторождениях

Значения индексов изменяются от 0,344 до 0,394 на Восточно-Таркосалинском, от 0,313 до 0,355 – на Тарасовском и от 0,261 до 0,302 – на Вынгаяхинском месторождениях, т.е. растительность Вынгаяхинского месторождения находится в худшем состоянии по сравнению с растительным

покровом других месторождений и в целом всего района. Значения EVI Вынгаяхинского месторождения в среднем ниже на 22%, чем индексы EVI всего района. Очевидно, на восстановление растительности здесь потребуется больше времени.

По литературным данным [16–18, 24], формирование и восстановление растительности на нефтедобывающих арктических территориях идет за счет развития в основном травянистой растительности, особенно видов семейства осоковых, злаковых, пушиц и др. Установлено, что для исследуемых месторождений тенденция изменения индекса EVI однотипна – высокие значения в 2020 г. и минимальные значения в 2014–2015 гг. В целом можно заключить, что в 2020 г. наблюдается тенденция увеличения индекса EVI как для месторождений (на 14,5% для Восточно-Таркосалинского, 15,7% для Вынгаяхинского и 13,4% для Тарасовского месторождений), так и для всего района, что свидетельствует о «позеленении» арктических регионов и восстановлении растительного покрова нефтедобывающих территорий.

Показатели состояния растительного покрова отражают современное состояние ландшафтов и несут информацию об его стрессовом состоянии вследствие нефтедобывающей и хозяйственной деятельности на этой территории или восстановительных реакциях. Индекс EVI рассматривается в качестве интегрального индикатора техногенной нагрузки на окружающую среду углеводородных месторождений. Расчет показателей техногенной нагрузки проводился путем усреднения индексов значений для каждого пикселя изображения EVI в границах трех исследуемых месторождений. Для анализа техногенной нагрузки были выбраны статистические данные за весь вегетационный период 2017 г. с наибольшим разбросом между минимальными и максимальными значениями. Получено, что в среднем интегральный индекс для Восточно-Таркосалинского месторождения равен 0,305, для Тарасовского – 0,219, для Вынгаяхинского – 0,165, из чего следует, что территория Вынгаяхинского месторождения наиболее подвержена негативному влиянию нефтедобывающего комплекса и имеет высокий уровень техногенной нагрузки, что согласовывается с данными рис. 2.

Для получения более точных экологических оценок состояния окружающей среды на месторождениях дополнительно проведены картирование и анализ техногенной нагрузки по результатам обработки космических снимков. На рис. 3 представлена индексная карта техногенной нагрузки исследуемой территории, созданная средствами геоинформационной системы ArcGis 10.8 и позволяющая провести оценку по графическому отображению средних значений вегетационного индекса EVI. Эти значения показаны цветом, что позволяет наглядно, в соответствии с индексной шкалой, определить состояние растительного покрова исследуемой территории.

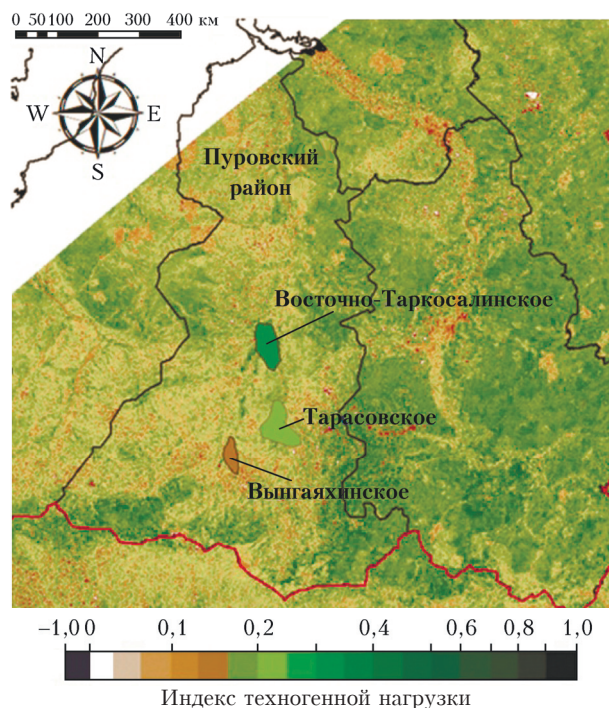


Рис. 3. Карта техногенной нагрузки Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.06>)

Из рис. 3 можно установить, что, как и было показано ранее (см. рис. 2), наиболее антропогенно нарушенной является территория Вынгаяхинского месторождения.

## Заключение

Разработанная ранее методика количественной оценки состояния растительного покрова нефтегазодобывающих территорий на основе вегетационных индексов по спутниковым данным MODIS была применена для анализа состояния растительного покрова углеводородных месторождений Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа.

По спутниковым данным MODIS выполнен анализ годовых циклов изменения вегетационного индекса EVI. На примере территории Пуровского района показан эффект «позеленения» арктических территорий на основе сравнения разногодичных значений индекса: увеличение EVI составило более 7% за 8-летний период исследований. За этот же период времени отмечено увеличение значений EVI на антропогенно нарушенных территориях нефтяных месторождений этого района, рост составил от 13,4 до 15,7%. Построены карты техногенной нагрузки нефтегазового комплекса и проведен анализ динамики состояния растительности территорий нефтегазоносных месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа. Показано, что определение текущих тенденций изменения растительного покрова и оценка техногенной нагрузки нефтедобывающих

территорий возможны с использованием дистанционных методов и интегральных вегетационных индексов.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования РФ (НИОКТР 121031500048-1).

## Список литературы

1. Кутинов Ю.Г., Колосов С.Г. Возможности и перспективы развития Центра космического мониторинга Арктики САФУ для решения задач рационального природопользования // *Пространство и Время. Спецвыпуск*. 2013. Т. 4, вып. 1. URL: <https://clck.ru/eiXAE> (дата обращения: 3.04.2022).
2. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса // *Исслед. Земли из космоса*. 2010. № 6. С. 3–17.
3. Терехин Э.А. Анализ спектральных свойств сельскохозяйственной растительности Белгородской области по спутниковым данным MODIS // *Научные ведомости. Сер. Естественные науки*. 2013. № 103. С. 150–156.
4. Gillespie T., Ostermann-Kelm S., Dong C., Willis K., Okin G., MacDonald G. Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California Ecological Indicators // *Ecol. Indic.* 2018. V. 88. P. 485–494.
5. Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С. Анализ влияния запечатанности почвенного покрова и озеленения на поле температур Волгоградской агломерации по данным MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 5. С. 125–141.
6. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Исследование вариаций индекса NDVI тундровой и таежной зон Восточной Сибири на примере территории Якутии // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 10. С. 891–894; Varlatova E.V., Solovyev V.S. Study of NDVI variations in tundra and taiga areas of eastern Siberia (Yakutia) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 64–67.
7. Лагутин А.А., Суторихин И.А., Сеницын В.В., Жуков А.П., Шмаков И.А. Мониторинг крупных промышленных центров юга Западной Сибири с использованием данных MODIS и наземных наблюдений // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 1. С. 60–66.
8. Днепровская В.П., Перемитина Т.О., Яценко И.Г. Мониторинг состояния растительного покрова нефтедобывающих территорий по спутниковым данным // *Оптика атмосф. и океана*. 2018. Т. 31, № 1. С. 57–62.
9. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
10. Eerens H., Piccard I., Royer A., Orlandi S. Methodology of the MARS crop yield forecasting system. V. 3: Remote sensing information, data processing and analysis. Wageningen: Alterra, 2004. 76 p.
11. Барталев С.А., Луян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю. Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрометра MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2005. Т. 2, № 2. С. 228–236.
12. Justice C.O. An overview of MODIS Land data processing and product status // *Remote Sens. Environ.* 2002. N 83. P. 3–15.
13. Нейштадт И.А. Построение безоблачных композитных спутниковых изображений MODIS для мониторинга растительности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Т. 2, № 3. С. 359–365.
14. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Луян Е.А. Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2008. Т. 5, № 2. С. 322–330.
15. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // *Геоматика*. 2009. № 3. С. 28–32.
16. Тишков А.А., Кренке А.Н. Позеленение Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // *Арктика: экология и экономика*. 2015. Т. 20, № 4. С. 28–37.
17. Лавриненко И.А., Лавриненко О.В. Влияние климатических изменений на растительный покров островов Баренцева моря // *Тр. Карел. науч. центра РАН*. 2013. Вып. 6. С. 5–16.
18. Forbes B.C., Fauria M.M., Zetterberg P. Russian Arctic warming and “greening” are closely tracked by tundra shrub willows // *GCB*. 2010. V. 16. P. 1542–1554.
19. Перемитина Т.О., Яценко И.Г. Дистанционный мониторинг экологического состояния нефтедобывающих территорий Западной Сибири // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2019. Т. 27, № 1. С. 53–57.
20. Перемитина Т.О., Яценко И.Г. Оценка динамики растительности территории нефтегазовых месторождений Томской области с применением спутниковых данных // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 11. С. 920–924.
21. Информационно-аналитический портал. URL: <https://neftegaz.ru/> (дата обращения: 3.04.2022).
22. Ростовцев А.А. Геофизические исследования скважин для выделения и оценки коллекторских свойств продуктивных пластов на Вынгайском нефтегазовом месторождении (Тюменская область): магистерская дис. / А.А. Ростовцев. Томск: НИ ТПУ, 2019. 90 с.
23. Шатыло С.В. Оценка экономической эффективности проекта разработки и эксплуатации нефтегазового месторождения: магистерская дис. / С.В. Шатыло. Томск: НИ ТПУ, 2018. 97 с.
24. Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // *Криосфера Земли*. 2010. Т. 14, № 1. С. 22–31.
25. Галицкая А.В., Симонова Е.В. Метод калибровки мультиспектральных снимков беспилотных летательных аппаратов // *Изв. Самар. науч. центра РАН*. 2018. Т. 20, № 6. С. 339–343.
26. Earth Data: Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center. URL: <https://clck.ru/eiXBM> (last access: 3.04.2022).

*A.V. Yashchenko, T.O. Peremitina, I.G. Yashchenko. Analysis of the state of oil producing Arctic territories based on satellite data.*

We consider the application of MODIS satellite data to the analysis of the condition of oil-producing Arctic territories. The state of the vegetation cover of the hydrocarbon fields in the Purovsky region of Yamalo-Nenets Autonomous Okrug: East-Tarkosalinskoye, Vyngayakhinskoye, and Tarasovskoye for the period 2013–2020 are studied. Based on Terra/MODIS satellite data and ArcGis geoinformation system, we calculated the average values of the vegetation index EVI (Enhanced Vegetation Index) for the areas under study. The anthropogenic load on the oil and gas complex is mapped, and the dynamics of the vegetation of the territories of oil and gas fields in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug is analyzed.