

УДК 504.064

DOI: 10.15372/ChUR2024546

EDN: TTKXLZ

Анализ экологического состояния нефтедобывающих территорий Западной Сибири с применением спутниковых данных MODIS

Т. О. ПЕРЕМИТИНА, И. Г. ЯЩЕНКО

*Институт химии нефти СО РАН,
Томск, Россия**E-mail: peremitinat@mail.ru*

(Поступила 15.12.2023; принята к печати 22.12.2023)

Аннотация

Исследовано экологическое состояние труднодоступных нефтедобывающих территорий Западной Сибири. Представлены результаты анализа динамики значений вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index) с целью оценки состояния растительного покрова территорий углеводородных месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа по спутниковым данным MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Проведен расчет средних значений EVI растительности территорий месторождений за полные периоды вегетации с 25 мая по 20 сентября 2013–2022 гг. Установлено, что в среднем значения индекса EVI за весь период вегетации в 2022 г. стали выше более чем на 20 % по сравнению с данными 2013 г., а также выявлены тенденции увеличения EVI в заключительном периоде вегетации за исследуемый 10-летний период.

Ключевые слова: спутниковые данные, вегетационный индекс, геоинформационные системы, растительный покров

ВВЕДЕНИЕ

Западная Сибирь представляет собой один из самых развитых и богатых нефтью и газом регионов в России. На ее территории расположен Западно-Сибирский нефтегазоносный бассейн, который охватывает такие регионы, как Новосибирская, Омская, Тюменская, Томская области, Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа. Вторым по значимости нефтедобывающим регионом в Западной Сибири считается Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), где сегодня добывается порядка 8 % от всей добычи нефти с конденсатом в России. На ЯНАО ежегодно приходится более 80 % российской и 20 % мировой добычи природного газа [1].

Нефть и нефтепродукты являются опасными источниками загрязнения окружающей среды, а продукты их трансформации еще более токсичны. Однако высокая востребованность в

углеводородах в настоящее время не позволяет сокращать объемы добычи. Добыча, транспортировка и переработка нефти неизбежно связаны с ее разливами и утечками углеводородного сырья. По оценкам экологов, 30–50 % всех разливов нефти прямо или косвенно связаны с человеческим фактором, а 20–40 % – вызваны отказом или неисправностью оборудования. Можно предположить, что в Арктике сумма потерь будет еще выше, так как в условиях экстремально низких температур резко возрастает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций [2].

В XXI веке уже нет необходимости описывать насколько экономически оправдано и целесообразно в задачах мониторинга состояния окружающей среды применять в качестве достоверных и актуальных (своевременных) данных мультиспектральные космические снимки – данные дистанционного зондирования Земли.

Цель настоящей работы – проведение оценки экологического состояния территорий арктических углеводородных месторождений за многолетний период. В качестве индикатора экологического состояния исследуемых территорий рассматривается растительный покров, так как он в полной степени и достоверно отражает процессы воздействия антропогенных и природных факторов на окружающую среду.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объект исследования

Объектом исследования является растительный покров территорий шести углеводородных месторождений ЯНАО: Вынгайхинское, Восточно-Таркосалинское, Губкинское, Комсомольское, Тарасовское, Уренгойское (рис. 1). Все исследуемые месторождения находятся в Пуровском районе ЯНАО.

Пуровский район ЯНАО занимает площадь 102.2 тыс. км², протяженность района с севера на юг около 720 км, при этом его территория включает две природные зоны: тундровую (южные субарктические тундры) и лесную (лестундра, северная и средняя тайга). На южной границе Пуровского района произрастают чистые или с единичными лиственницей и березой

лишайниковые боры, кустистые лишайники образуют сплошной напочвенный покров. Значительные площади лишайниковых сосняков отмечены на Вынгайхинском и Комсомольском месторождениях. Для северной части Пуровского района характерно развитие редкостойных лиственничных, лиственнично-еловых и лиственнично-сосновых лесов с примесью кедра и сосны, а также плоско- и крупнобугристых мохово-лишайниковых комплексных болот и ивово-лугово-болотных растительных сообществ в поймах крупных рек [3].

Климат района резко континентальный, основной особенностью климата является большая изменчивость температур и непостоянство их в течение суток и времени года. Климат района характеризуется суровостью, коротким прохладным летом и затяжной холодной зимой. Продолжительность холодного периода составляет 8 месяцев (с октября по май) [1].

Основные полезные ископаемые шести исследуемых углеводородных месторождений – нефть, горючий газ (метан, этан, пропан, бутан), конденсат, за исключением месторождений Комсомольское и Уренгойское, где в основном добывается газ. Крупными по своим запасам считаются месторождения Восточно-Таркосалинское, Вынгайхинское и Губкинское. Запасы Тарасовского месторождения оцениваются как средние.

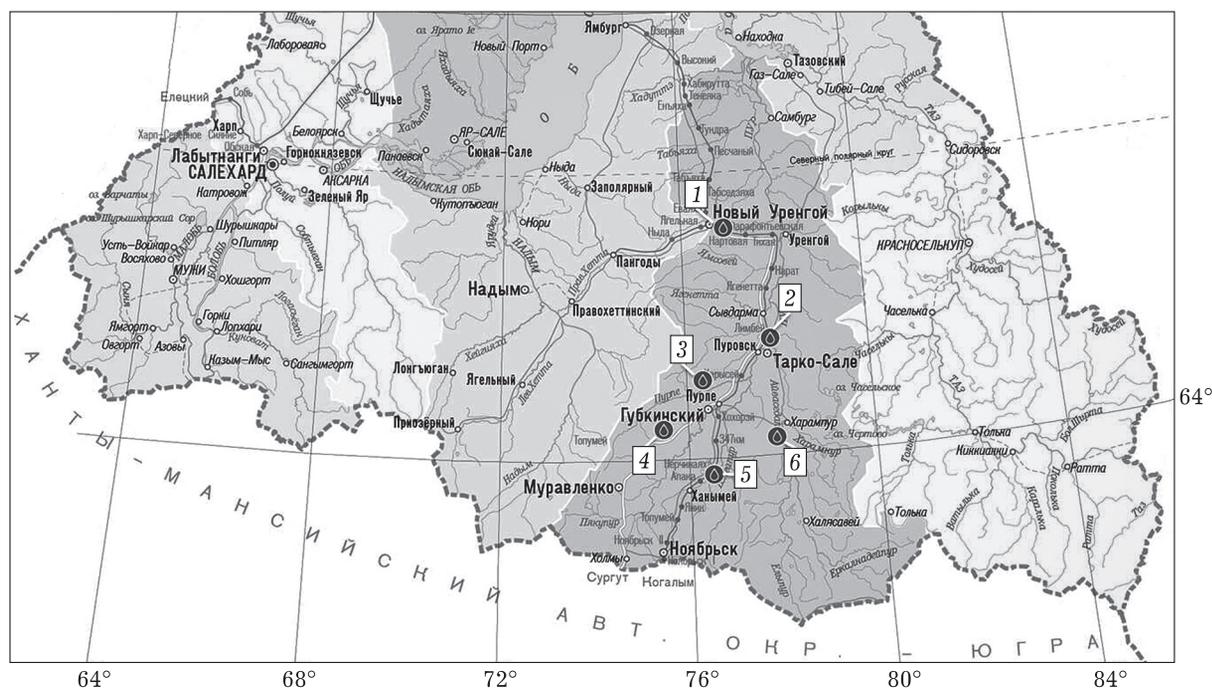


Рис. 1. Исследуемые территории углеводородных месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа: 1 – Уренгойское; 2 – Восточно-Таркосалинское; 3 – Губкинское; 4 – Вынгайхинское; 5 – Комсомольское; 6 – Тарасовское.

ТАБЛИЦА 1

Сведения об образовании, утилизации, обезвреживании и размещении отходов производства и потребления по Ямало-Ненецкому автономному округу за 2017–2021 гг. (по данным [1])

Год	Количество отходов, т			
	образовавшихся	утилизированных	обезвреженных	размещенных
2017	930 365.6	4 468 690.0	47 990.6	138 325.0
2018	939 432.4	721 310.2	21 589.6	171 618.0
2019	1 728 953.5	1 350 632.2	123 380.0	189 959.0
2020	487 680.0	464 543.0	48 677.0	193 724.0
2021	1 882 907.0	1 645 407.0	42 296.0	223 457.0

Нефти исследуемых месторождений обладают высоким качеством, являются легкими (плотность в среднем 0.8131 г/см^3), маловязкими (вязкость в среднем не выше $6 \text{ мм}^2/\text{с}$), среднепарафинистыми (содержание парафинов не превышает 6 мас. %), малосмолистыми (содержание смол не выше 4 мас. %), обеднены содержанием серы и асфальтенов (содержание менее 0.3 мас. %). Состав газа месторождений в среднем следующий: метан (CH_4) – 88 %, этан (C_2H_6) – 4 %, пропан (C_3H_8) – менее 3 %, бутан (C_4H_{10}) – менее 2 %. Газ сухой, состоит в основном из метана с низким содержанием этана, практически отсутствует пропан и бутан. Информация о свойствах нефти и газа получена на основе массива данных объемом 568 образцов из базы данных лаборатории “Научно-исследовательский информационный центр” Института химии нефти СО РАН (НИИЦ ИХН СО РАН).

По данным Департамента защиты окружающей среды и природных ресурсов ЯНАО [1], отходы от добычи полезных ископаемых служат основным видом загрязнения природной среды. В 2021 г. образовалось 1 422 852 т, что составило 75.5 % от их общего количества (табл. 1).

Вследствие ряда особенностей нефтегазодобывающих арктических территорий (суровый климат, труднодоступность, уязвимость, а также долгий восстановительный период растительных сообществ при негативных воздействиях) значимо и актуально провести оценку динамики растительного покрова нефтегазоносных месторождений ЯНАО с использованием свободно распространяемых спутниковых данных.

Материалы и методы

В данном исследовании для оценки воздействия нефтегазового комплекса на состояние растительного покрова исследуемых территорий использованы данные радиометра MODIS

ТАБЛИЦА 2

Используемые композиты MOD13Q1 с 2013 по 2022 гг. (по данным [5])

Номер	Композит	16-дневный цикл
1	145	25 мая – 9 июня
2	161	10–25 июня
3	177	26 июня – 11 июля
4	193	12–27 июля
5	209	28 июля – 12 августа
6	225	13–28 августа
7	241	29 августа – 13 сентября
8	257	14–29 сентября

(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на спутнике Terra. В НИИЦ ИХН СО РАН сформирована и регулярно пополняется коллекция спутниковых данных Terra/MODIS [4]. Следует отметить, что спутниковые данные системы MODIS, несмотря на санкции, находятся в свободном доступе и в настоящее время.

В данной работе проведен анализ значений вегетационного индекса за период с 1 июня по 1 октября каждого года исследований (2013–2022 гг.), поэтому использовано восемь 16-дневных композитов MOD13Q1 с пространственным разрешением 250 м (табл. 2)

В работах [6, 7] изложены методические вопросы мониторинга состояния растительного покрова нефтегазодобывающих территорий с применением значений вегетационных индексов. Показано, что особенно значимыми вегетационные индексы становятся при расчетах продуктивности и запасов биомассы [8].

В данной работе использован вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index), который наиболее применим в задачах мониторинга изменения состояния растительного покрова, поскольку влияние почвы и атмосферы в значениях данного индекса минимизировано. Значения индекса EVI изменяются в пределах от –1

до 1 и позволяют проводить сопоставление рассчитанных значений с состоянием растительного покрова. Например, для зеленой (здоровой, неугнетенной) растительности ЯНАО индекс EVI принимает значения от 0.2 до 0.4 [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки состояния растительного покрова шести углеводородных месторождений Пуровского района ЯНАО была изучена динамика изменения значений индекса EVI (Enhanced Vegetation Index) за вегетационные периоды с 2013 по 2022 гг.

Средствами геоинформационной системы ArcGis 10.8 были созданы полигональные векторные слои территорий исследуемых углеводородных месторождений. Далее выполнен расчет значений индекса EVI для исследуемых территорий по спутниковым данным MOD13Q1 (2013–2022 гг.). Расчет проведен с применением инструмента “зональная статистика” путем наложения векторных моделей полигонов территорий углеводородных месторождений на разновременные спутниковые снимки MOD13Q1 с информацией об индексе EVI.

На **первом шаге** проведено исследование динамики значений индекса EVI за полные периоды вегетации с 25 мая (145-й композит) по 20 сентября (257-й композит) для всех исследуемых углеводородных месторождений в 2013–

2022 гг. На рис. 2 представлена динамика средних значений индекса EVI за 10-летний период.

Установлено, что для растительного покрова территорий шести углеводородных месторождений в начале периода вегетации (145-й композит) в 2013 г. изменения значений EVI находятся в диапазоне от 0.1365 до 0.1961. В 2022 г. значения индекса EVI выше и варьируются в диапазоне от 0.2027 до 0.2599, что соответствует увеличению индекса за 10 лет в среднем на 5–25 %. Далее, в завершение вегетационного периода (257-й композит) значения EVI в 2013 г. изменяются в диапазоне от 0.2145 до 0.2504. В 2022 г. значения EVI в этот период опять значительно выше и колеблются в диапазоне от 0.2173 до 0.2672, увеличение в среднем составило 5 %.

Данные факты позволяют выдвинуть гипотезу об увеличении вегетационного периода растительных сообществ, например, с мая по октябрь, что можно косвенно связать с климатическими изменениями в сторону потепления за 10-летний период. Ранее авторы [8, 9] по данным съемки Terra/MODIS за период 2000–2009 гг. показали, что период потепления последних десятилетий способствовал росту фитомассы (закустаривание, залужение) на Европейском Севере и в некоторых районах Восточной Сибири.

Получаемые со спутников спектральные характеристики арктических экосистем свидетельствуют о возрастании к началу XXI века значений вегетационных индексов в Арктике, отражающих степень “позеленения” территории. Данный

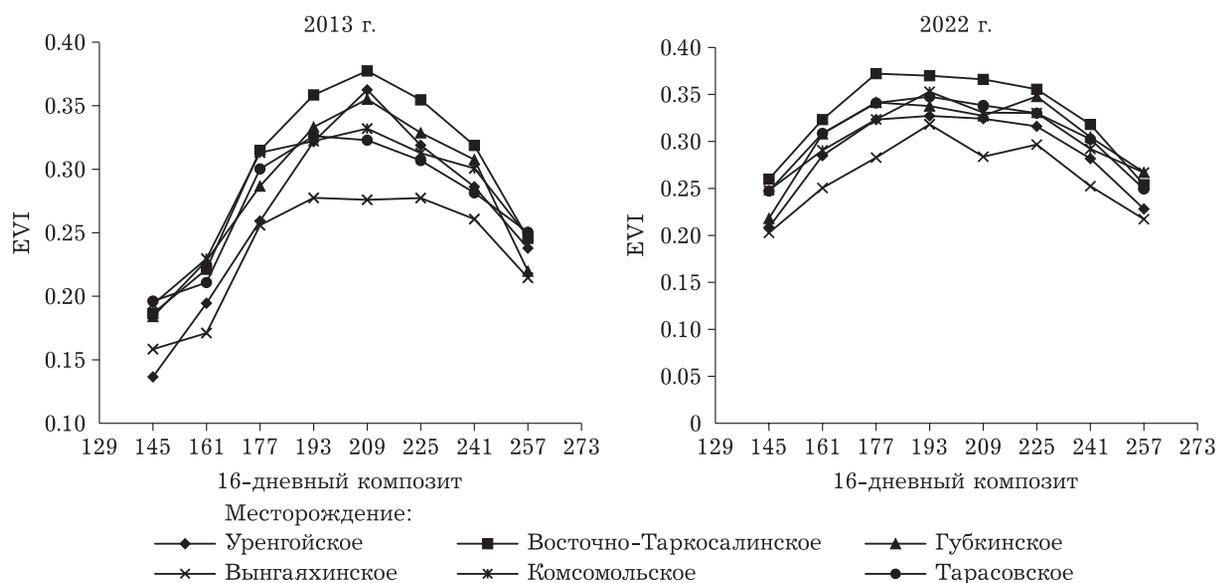


Рис. 2. Динамика средних значений индекса EVI вегетационных периодов 2013–2022 гг. для месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа.

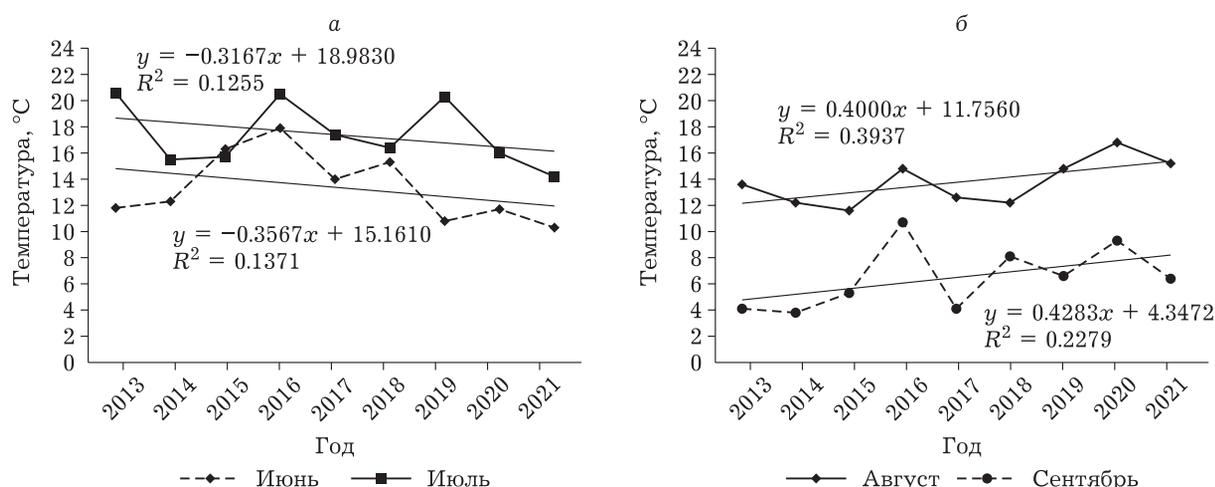


Рис. 3. Ход среднемесячной температуры за период 2013–2022 гг. в июне–июле (а) и в августе–сентябре (б).

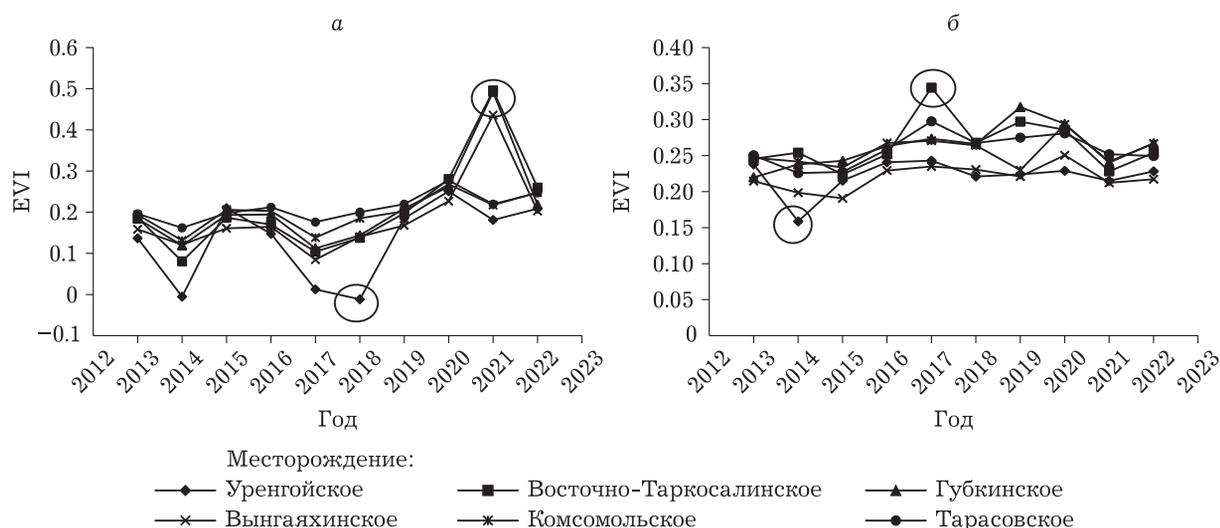


Рис. 4. Динамика средних значений индекса EVI для месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа: а – 145-й композит (с 25 мая по 9 июня); б – 257-й композит (с 14 по 20 сентября).

факт обусловлен увеличением интенсивности фотосинтеза, запасов надземной фитомассы в условиях роста продолжительности вегетационного периода, улучшения теплового режима почв и большей доступности питательных веществ для растений [9].

С применением Автоматизированной информационной системы обработки режимной информации (АИСОРИ) [10] сформированы массивы среднемесячных температур за май–сентябрь 2013–2021 гг. по данным метеостанции “Тарко-Сале”, расположенной на территории Пуровского района около города Тарко-Сале. Установлены отрицательные тренды хода среднемесячной температуры в июне и июле (рис. 3, а), что свидетельствует о снижении температуры в середине периода вегетации в исследованные

года. Однако в августе–сентябре 2013–2021 гг. установлены положительные тренды хода среднемесячной температуры (см. рис. 3, б), что свидетельствует о значительном повышении температур – примерно на 4 °С за исследованный период.

Для проверки данной гипотезы на **втором шаге** проведен анализ динамики значений индекса EVI для 145-го и 257-го композитов в 2013–2022 гг. (рис. 4). Высокие значения индекса EVI соответствуют состоянию растительного покрова Восточно-Таркосалинского месторождения в июне 2021 г. (см. рис. 4, а) и в сентябре 2017 г. (см. рис. 4, б). Низкие значения индекса EVI установлены для растительности Уренгойского месторождения в начале периода вегетации в 2018 г. (–0.0116, см. рис. 4, а) и в конце

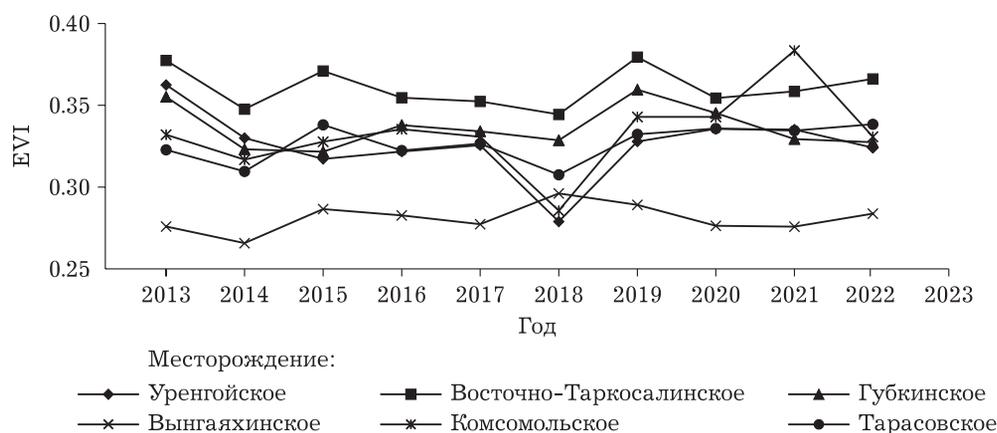


Рис. 5. Динамика изменения средних значений индекса EVI с 28 июля по 12 августа 2013–2022 гг. (209-й композит) для месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа.

периода вегетации в 2014 г. (0.1587, см. рис. 4, б). В большей мере этот факт можно объяснить наиболее северным местоположением Уренгойского месторождения в тундровой зоне, где древесная растительность развита слабо. Флора типично тундровая – ягельники с редкими зарослями карликовой ивы и березы. По берегам рек и ручьев растут хвойные деревья (сибирская ель, лиственница).

Выполнено сопоставление графиков хода среднемесячной температуры (см. рис. 3) и динамики средних значений индекса EVI в начале и конце периода вегетации (см. рис. 4). По результатам сопоставления можно отметить, что в июне наблюдается значительный разброс значений как среднемесячной температуры (см. рис. 3, а), так и значений вегетационного индекса EVI (см. рис. 4, а) по сравнению с аналогичными параметрами в заключительный период вегетации (см. рис. 3, б и рис. 4, б).

На **третьем шаге** проведен анализ динамики вегетационного индекса EVI для пикового периода вегетации с 28 июля по 12 августа 2013–2022 гг. (209-й композит) для всех шести исследуемых территорий углеводородных месторождений (рис. 5).

Анализ изменения средних значений индекса EVI в пиковый период вегетации показал, что для большинства исследуемых территорий тенденция изменения значений индекса EVI однотипна (см. рис. 5). Установлены высокие значения в 2013 и 2019–2022 гг. и минимальные значения в 2014 и 2018 г. Значения индекса EVI растительного покрова Вынгаяхинского месторождения (см. рис. 5) имеют самые низкие значения в диапазоне от 0.2657 до 0.2961. Данный факт можно объяснить тем, что Вынгаяхинское

месторождение находится в сильно заболоченной местности с травяными, кустарничково-травяными и мохово-лишайниковыми болотами и мелкими озерами. Однако в 2018 г. для данного месторождения отмечен невысокий рост значения EVI до 0.2961, в то время как для остальных пяти месторождений именно в 2018 г. отмечены минимальные значения EVI. Так, для Уренгойского и Комсомольского месторождений значения снизились до 0.2789 и 0.2856 соответственно.

Полученные результаты анализа значений индекса EVI для растительного покрова территории углеводородных месторождений ЯНАО совместно с учетом хода среднемесячной температуры за период 2013–2022 гг. позволили установить, что глобальное изменение климатических условий, проявляющееся в росте температуры, установлено для заключительного периода вегетации (август–сентябрь). Особенно в северных регионах рост температур вызывает увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере. Данный процесс сопровождается сокращением площади ледников, деградацией вечной мерзлоты, что наносит существенный ущерб строениям, приводит к подтоплению объектов инфраструктуры, увеличению пожароопасности в северных регионах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением спутниковых данных проведена диагностика состояния растительного покрова труднодоступных территорий шести углеводородных месторождений ЯНАО. Анализ динамики средних значений индекса EVI позволил определить минимальные и максимальные зна-

чения индекса для исследуемых территорий, а также выявить тенденции увеличения значений индекса EVI в заключительном периоде вегетации за исследуемый 10-летний период. В среднем значения индекса за весь период вегетации в 2022 г. стали выше на 5–25 % по сравнению с данными 2013 г. По результатам исследования можно заключить, что последствия глобального потепления в Арктике отражаются на состоянии растительного покрова. Это можно отметить не только по климатогенным трендам, но и по ежегодным изменениям запасов фитомассы. В дальнейшем необходимо выявить наиболее значимые факторы, влияющие на изменения объема фитомассы, и проанализировать динамику продуктивности исследуемых арктических территорий.

Таким образом, анализ динамики вегетационных индексов по спутниковым данным позволил провести оценку экологической обстановки исследуемых территорий, что крайне важно для мониторинга и контроля экологического состояния труднодоступных территорий ЯНАО. В дальнейшем для более точной оценки, используя полученные данные, предлагается разработать набор дополнительных функциональных возможностей примененной методики: построение карт техногенной нагрузки, а также прогнозирование и распознавание потенциальных экологически уязвимых зон арктических нефтегазодобывающих территорий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии нефти СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР № 121031500046-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Доклад “Об экологической ситуации в Ямало-Ненецком автономном округе в 2022 году” [Электронный ресурс] / Департамент природ. ресурсов и экологии Ямало-Ненецкого авт. округа. Салехард, 2023. URL: <https://dprg.yanao.ru/documents/active/273069/> (дата обращения: 03.12.2023).
- 2 Богоявленский В. И., Богоявленский И. В. Освоение ресурсов углеводородов и экологическая безопасность в Арктике // Арктические ведомости. 2021. № 1 (31). С. 30–43.
- 3 Хозяинова Н. В. Флора и растительность северной тайги Пуровского района Тюменской области (север Западной Сибири) // Вест. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2008. № 8. С. 27–42.
- 4 MODIS: Vegetation Index User's Guide [Electronic resource]. URL: https://lpdaac.usgs.gov/documents/621/MOD13_User_Guide_V61.pdf (accessed: 15.02.2024).
- 5 MODIS: MOD13Q1 [Electronic resource]. URL: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/61/MOD13Q1/> (accessed: 15.02.2024). Режим доступа: для авторизир. пользователей.
- 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.
- 7 Перемитина Т. О., Яценко И. Г. Алгоритм комплексного анализа многомерных данных об экологическом состоянии окружающей среды // Информ. технологии. 2019. Т. 25, № 1. С. 58–63.
- 8 Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Кренке А. Н., Тertiцкий Г. М. “Позеленение” тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // Арктика: экология и экономика. 2018. № 2 (30). С. 31–44.
- 9 Мячина К. В., Чибилев А. А. Выявление нарушенных нефтедобычей степных земель Оренбургского Заволжья на основе спутниковых данных // География и природные ресурсы. 2015. № 4. С. 135–141.
- 10 Специализированные массивы для климатических исследований [сайт]. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/> (дата обращения: 12.03.2023). Режим доступа: для авторизир. пользователей.