

УДК 504.064

Исследование динамики состояния растительного покрова территорий арктических углеводородных месторождений на основе мультиспектральных космических снимков

Т.О. Перемитина[✉], И.Г. Яценко*

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

Поступила в редакцию 20.02.2023 г.;
после доработки 27.03.2023 г.;
принята к печати 10.04.2023 г.

Проанализирована динамика состояния растительного покрова территорий арктических углеводородных месторождений (Уренгойского, Восточно-Таркосалинского, Губкинского, Вынгаяхинского, Комсомольского и Тарасовского) Пу ровского района Ямало-Ненецкого автономного округа на основе спутниковых данных Terra/MODIS. 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 за весь период вегетации в 2022 г. стали выше на 5–25% по сравнению с 2013 г., а также выявлены тенденции увеличения EVI в заключительном периоде вегетации за 10 лет исследований.

Ключевые слова: спутниковые данные, вегетационный индекс, геоинформационные системы, растительный покров, углеводородное месторождение; satellite data, vegetation index, geoinformation system, vegetation cover, hydrocarbon deposit.

Введение

По данным Всемирной метеорологической организации, период 2015–2020 гг. был самым теплым десятилетием, а 2011–2020 гг. – самым теплым десятилетием за всю историю наблюдений [1]. За 1976–2020 гг. глобальная температура приземного воздуха выросла на 0,8 °С. Особенно быстро температура повышалась в северной полярной области, где за 30 лет (1991–2020 гг.) линейный рост среднегодовой температуры составил ~2,64 °С. Межправительственная группа экспертов по изменению климата назвала Арктику одним из четырех наиболее уязвимых регионов мира.

Рост температур, особенно в северных регионах, 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, увеличивает пожароопасность [1].

Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО) расположен в арктической зоне Западно-Сибирской равнины и относится к районам Крайнего Севера [2]. Развитие региона в ближайшие десятилетия в значительной степени обусловлено усовершенствованием

действующих и разработкой новых углеводородных месторождений. Увеличение интенсивности зимних осадков отрицательно воздействует на сооружения нефтегазодобычи. Опасные последствия изменений климата для нефтегазовой отрасли арктических территорий связаны с деградацией многолетней мерзлоты. На фоне глобального потепления значительную роль в этом процессе играет техногенное воздействие, по этой причине необходим регулярный мониторинг состояния окружающей среды.

Основная цель работы – исследование динамики состояния растительного покрова территорий арктических углеводородных месторождений за 2013–2022 гг. на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ).

Объект исследования

Объектом исследования является растительный покров территорий шести углеводородных месторождений ЯНАО: Вынгаяхинского, Восточно-Таркосалинского, Губкинского, Комсомольского, Тарасовского, Уренгойского (рис. 1). Все месторождения находятся в Пу ровском районе Ямало-Ненецкого автономного округа.

Пу ровский район ЯНАО занимает площадь 102,2 тыс. км², протяженность с севера на юг – около 720 км. Его территория включает две природные зоны: тундровую (южные субарктические

* Татьяна Олеговна Перемитина (pto@ipc.tsc.ru);
Ирина Германовна Яценко (sric@ipc.tsc.ru).

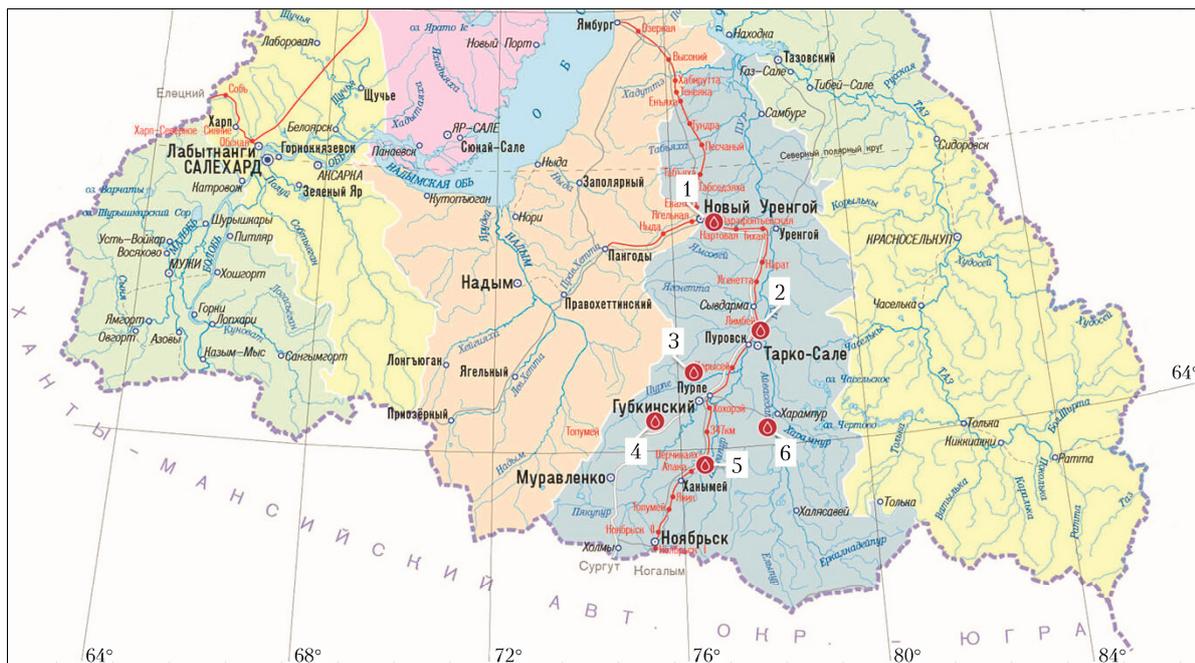


Рис. 1. Исследуемые территории углеводородных месторождений ЯНАО: 1 – Уренгойское, 2 – Восточно-Таркосалинское, 3 – Губкинское, 4 – Вынгайяхинское, 5 – Комсомольское, 6 – Тарасовское (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.07>)

тундры) и лесную (лесотундра, 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 Вынгайяхинском 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, с большой изменчивостью температур и непостоянством их в течение суток и сезона, суровый, с коротким прохладным летом и затяжной холодной зимой. Продолжительность холодного периода составляет 8 месяцев (с октября по май) [1].

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

Материалы и методы исследования

Радиометр MODIS/Terra (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), данные которого мы использовали для исследования, установлен на борту спутников Terra и Aqua [4, 5].

Продукты MODIS являются результатом применения следующих корректировок и алгоритмов расчета:

- алгоритмы предварительной обработки, необходимые для создания безоблачных мозаик;
- алгоритмы постобработки, применяемые для оптимизации значений вегетационного индекса, полученных из временных последовательностей изображений.

В работе использован продукт MOD13Q1, содержащий цифровые слои со значениями вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index) и представляющий 16-дневные цифровые композиции с пространственным разрешением 250 м. Архив спутниковых продуктов MOD13Q1 хранится на серверах NASA [5]. Следует отметить, что спутниковые данные системы MODIS, несмотря на санкции, находятся в свободном доступе и в настоящее время.

Согласно Приказу Рослесхоза от 10.11.2011 г. № 472 (ред. от 15.03.2018 г.) «Об утверждении Методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов», продолжительность вегетационного периода в ЯНАО составляет четыре месяца – с 1 июня по 1 октября. В связи с этим в исследовании использовано восемь 16-дневных композитов MOD13Q1 с пространственным разрешением 250 м (таблица).

В ранее опубликованных работах [6, 7] авторами изложены методические вопросы анализа экологического состояния нефтегазодобывающих территорий с применением вегетационных индексов. Показано, что особенно значимыми данные параметры становятся при расчетах продуктивности и запасов биомассы [8].

Композиты MOD13Q1 с 2013 по 2022 г.

| № | Композит | 16-дневный цикл |
|---|----------|--------------------------|
| 1 | 145 | 25 мая – 9 июня |
| 2 | 161 | 10–25 июня |
| 3 | 177 | 26 июня – 7 июля |
| 4 | 193 | 7–27 июля |
| 5 | 209 | 28 июля – 12 августа |
| 6 | 225 | 13–28 августа |
| 7 | 241 | 29 августа – 13 сентября |
| 8 | 257 | 14–20 сентября |

Вегетационный индекс EVI часто необходим для решения задач мониторинга изменения состояния растительного покрова, поскольку влияние почвы и атмосферы в значениях данного индекса минимизировано.

EVI рассчитывается по формуле

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

где ρ_{blue} – спектральная яркость поверхности в синем диапазоне; ρ_{nir} – в ближнем инфракрасном диапазоне; ρ_{red} – в красном диапазоне; L – поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы; C_1, C_2 – коэффициенты аэрозольной устойчивости, используемые синий канал для коррекции аэрозольного влияния в красном канале.

Индекс EVI варьируется в пределах от –1 до 1 и позволяет сопоставлять рассчитанные значения с состоянием растительного покрова. Например, для растительного покрова арктических территорий индекс EVI меняется от 0,2 до 0,5 [9].

Результаты исследования

Средствами геоинформационной системы ArcGis 10.8 были созданы полигональные векторные слои территорий исследуемых углеводородных месторождений. Далее выполнен расчет средних значений EVI для каждой исследуемой территории по спутниковым данным MOD13Q1 (2013–2022 гг.) с помощью инструмента «зональная статистика» путем наложения векторных моделей полигонов территорий углеводородных месторождений на разновременные спутниковые снимки MOD13Q1 с информацией об индексе EVI.

На *первом шаге* исследования проведен анализ динамики значений EVI за полные периоды вегетации с 25 мая (145-й композит) по 20 сентября (257-й композит) для всех исследуемых в 2013–2022 гг. углеводородных месторождений. На рис. 2 представлены графики изменений средних значений индекса EVI за 10-летний период.

Установлено, что для растительного покрова территорий шести углеводородных месторождений в начале периода вегетации в 2013 г. значения EVI находятся в диапазоне от 0,1936 до 0,1961. В 2022 г. значения индекса выше и варьируются от 0,2027 до 0,2599, что соответствует увеличению EVI за 10 лет в среднем на 5–25%. В завершении вегетационного периода (257-й композит) значения индекса в 2013 г. изменяются от 0,2145 до 0,2504.

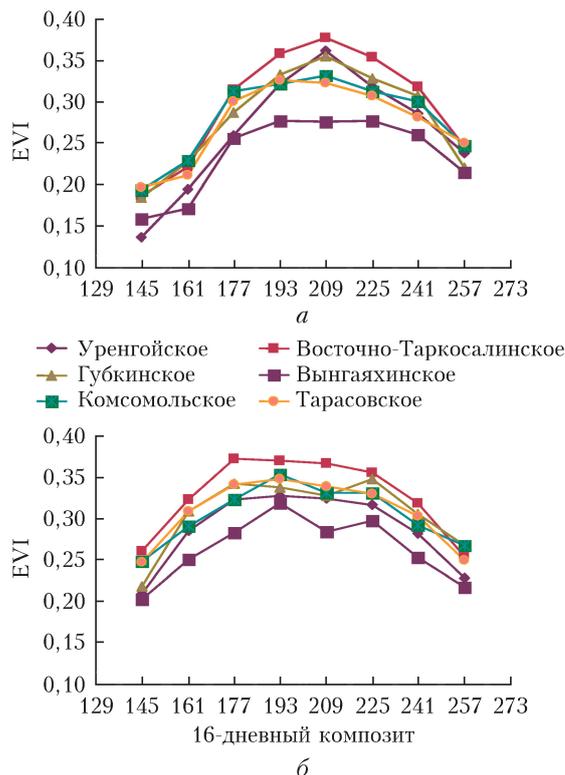


Рис. 2. Динамика средних значений индекса EVI периодов вегетации 2013 (а) и 2022 гг. (б)

В 2022 г. EVI также выше: 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 потеплением климата за последние 10 лет. Данные съемки Terra/MODIS за 2000–2009 гг. [8–10] показали, что потепление последних десятилетий способствовало 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 в. значений вегетационных индексов в Арктике, отражающих степень «озеленения» территории, что обусловлено увеличением интенсивности фотосинтеза, запасов наземной фитомассы в условиях увеличения продолжительности вегетационного периода, улучшением теплового режима почв и большей доступностью питательных веществ для растений.

С помощью автоматизированной информационной системы обработки информации о характере, распределении и изменении параметров, процессов и явлений, используемой для оценки состояния объектов природной среды [11], сформированы массивы среднемесячных температур за май – сентябрь 2013–2021 гг. по данным метеостанции «Тарко-Сале», расположенной на территории Пуровского района около г. Тарко-Сале. Выявлены отрицательные тренды изменения среднемесячной температуры в июне и июле (рис. 3, а), что говорит об обратном –

снижении температуры в середине периода вегетации за исследуемые годы. Однако в августе-сентябре 2013–2021 гг. наблюдаются положительные тренды среднемесячной температуры, что говорит о значительном повышении температур – примерно на 4 °С за последние годы.

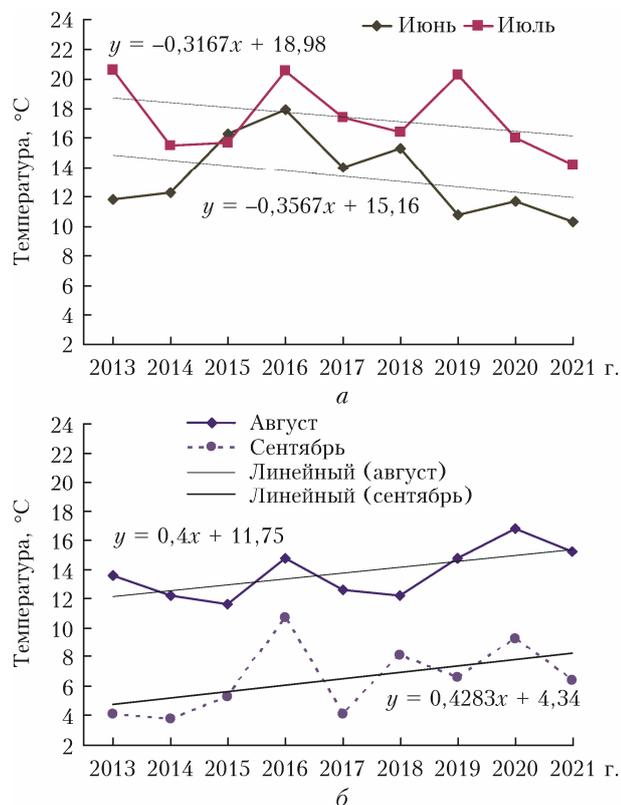


Рис. 3. Ход среднемесячной температуры за 2013–2022 гг.: а – июнь-июль; б – август-сентябрь

Для исследования данной гипотезы на *втором шаге* проведен анализ динамики значений EVI для 145-го и 257-го композитов в 2013–2022 гг. (рис. 4).

Высокие значения индекса EVI на рис. 4 соответствуют состоянию растительности Восточно-Таркосалинского месторождения в июне 2021 г. (рис. 4, а) и в сентябре 2017 г. (рис. 4, б). Низкие значения EVI выявлены для растительности самого северного месторождения – Уренгойского, в начале периода вегетации (рис. 4, а) в 2018 г. (–0,0116) и в конце (рис. 4, б) в 2014 г. (0,1587). В большей мере этот факт можно объяснить северным местоположением 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).

Сопоставляя графики хода среднемесячной температуры (рис. 3) и динамику средних значений EVI в начале и конце периода вегетации (рис. 4), можно отметить, что в июне наблюдается значительный разброс значений как среднемесячной температуры (рис. 3, а), так и вегетационного EVI (рис. 4, а) по сравнению с заключительным периодом вегетации (рис. 3, б; рис. 4, б).

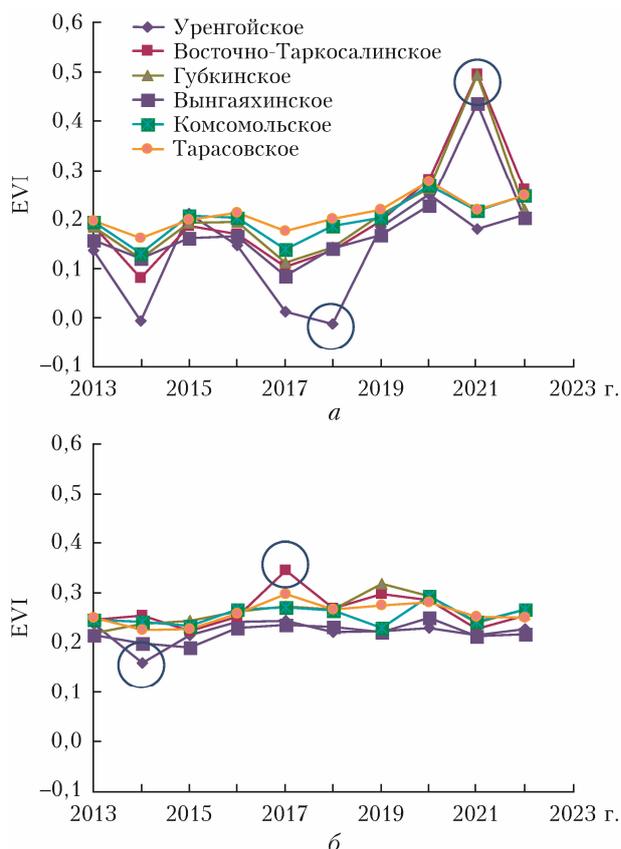


Рис. 4. Динамика средних значений индекса EVI: а – 145-й композит (25 мая – 9 июня); б – 257-й композит (14–20 сентября)

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

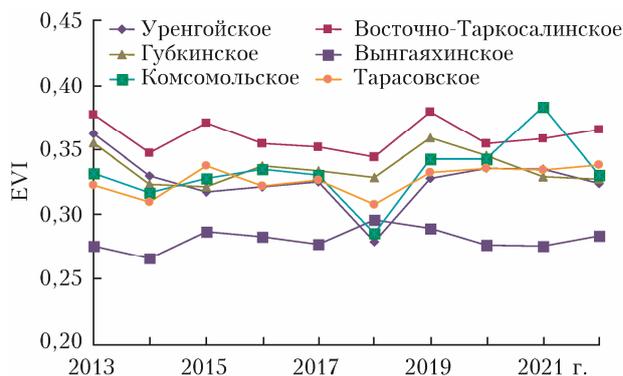


Рис. 5. Динамика средних значений индекса EVI с 28 июля – 12 августа (209-й композит)

Анализ динамики индекса EVI в этот период (рис. 5) показал, что для большинства исследуемых территорий поведение EVI однотипно: высокие значения в 2013, 2019–2022 гг. и минимальные значения в 2014 и 2018 гг. Как видно из рис. 5,

у индекса EVI растительного покрова Вынгаяхинского месторождения самые низкие значения (от 0,2657 до 0,2961), так как месторождение находится в сильно заболоченной местности с травяными, кустарничково-травяными и мохово-лишайниковыми болотами и мелкими озерами. Однако в 2018 г. для данного месторождения отмечено небольшое увеличение EVI до 0,2961, в то время как для остальных месторождений именно в 2018 г. значения EVI были минимальными (например, для Уренгойского и Комсомольского они снизились до 0,2789 и 0,2856 соответственно).

Результаты анализа индекса EVI для оценки растительного покрова территории углеводородных месторождений ЯНАО совместно с учетом хода среднемесячной температуры за 2013–2022 гг. позволили установить, что глобальное изменение климатических условий, проявляющееся в росте температуры, выявлено для последних месяцев вегетации (август–сентябрь).

Заключение

На основе спутниковых данных проведена диагностика состояния растительного покрова труднодоступных территорий шести углеводородных месторождений ЯНАО. Анализ динамики средних значений индекса EVI позволил определить минимальные и максимальные его значения, а также выявить тенденции увеличения EVI в заключительном периоде вегетации за исследуемый 10-летний период. Средние за время вегетации значения индекса 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 влияют на состояние растительного покрова. В дальнейшем необходимо выявить наиболее значимые факторы изменения объема фитомассы и проанализировать динамику продуктивности исследуемых арктических территорий.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН (НИОКТР 121031500048-1).

T.O. Peremitina, I.G. Yashchenko. Estimation of the impact of the oil and gas complex on the biosphere of the Arctic territories on the basis of multispectral satellite data.

The ecological state of the Arctic hydrocarbon deposit territories over the period 2013–2022 is estimated. Vegetation cover is considered an indicator of the ecological state of the territories under study. Based on the Terra/MODIS satellite data, the state of the vegetation cover of hydrocarbon fields in the Purovsky district of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug is studied: Urengoykoye, Vostochno-Tarkosalinskoye, Gubkinskoye, Vyngayakhinskoye, Komsomolskoye, and Tarasovskoye. Using the ArcGis geographic information system, the average values of EVI (Enhanced Vegetation Index) of the field vegetation cover for the full growing season from May 25 to September 20, 2013–2022, are calculated. The EVI minima and maxima for the territories are determined. Tendencies towards an increase in EVI in the final growing season over the 10-year period under study are found.

Список литературы

1. *Доклад об экологической ситуации в Ямало-Ненецком автономном округе в 2021 году.* URL: <https://dprg.yanao.ru/documents/active/187034/> (дата обращения: 13.02.2023).
2. *Алексеевский Н.И., Добролюбов С.А., Тикунов В.С.* Российская Арктика в XXI веке: природные условия и риски освоения. М.: Феория, 2013. 144 с.
3. *Хозяинова Н.В.* Флора и растительность северной тайги Пуровского района Тюменской области (север Западной Сибири) // *Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения.* 2008. № 8. С. 27–42.
4. *Официальный сайт радиометра MODIS: описание системы TERRA и сканера MODIS.* [Б.м.], 2023. URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 13.02.2023).
5. *MODIS: MOD13Q1.* URL: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData/6/MOD13Q1> (дата обращения: 13.02.2023).
6. *Днепровская В.П., Перемитина Т.О., Яценко И.Г.* Мониторинг состояния растительного покрова нефтедобывающих территорий Томской области по спутниковым данным // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 1. С. 57–62.
7. *Перемитина Т.О., Яценко И.Г.* Применение вегетационных индексов для диагностики состояния природных экосистем на объектах нефтегазового комплекса // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 6. С. 471–475.
8. *Тишков А.А., Белоновская Е.А., Кренке А.Н., Тутова С.В., Царевская Н.Г.* Изменения биологической продуктивности наземных экосистем российской арктики в XXI в. // *Арктика: экология и экономика.* 2021. Т. 11, № 1. С. 30–41.
9. *Ims R.A., Henden J.A., Stromeng M.A., Thingnes A.V., Garmo M.J., Jepsen J.U.* Arctic greening and bird nest predation risk across tundra ecotones // *Nat. Clim. Change.* 2019. V. 9. P. 607–610.
10. *Елсаков В.В., Кулюгина Е.Е., Щанов В.М.* Тренды изменений растительного покрова Югорского полуострова последнего десятилетия: сопоставление результатов дистанционных и полевых исследований // *Геоботаническое картографирование.* 2013. С. 93–111.
11. *Специализированные массивы для климатических исследований: Выборка данных обеспечивается Web-технологией «Айсори – Удаленный доступ к ЯОД-архивам».* Обнинск, 2023. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/> (дата обращения: 13.02.2023).