

УДК 502.335:528.88

© Т.О. Перемитина, И.Г. Яценко, В.П. Днепровская

20 02 Т.О. Перемитина, И.Г. Яценко, В.П. Днепровская 22 02

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Введение

Нефтегазодобывающий комплекс представляет собой сложную систему взаимосвязанных производств, состоящую из эксплуатационных скважин, установок комплексной подготовки поступающего углеводородного сырья и других объектов, относящихся как непосредственно к добыче нефти и газа, так и к обеспечению жизнедеятельности населения. Воздействие нефтегазового комплекса на природную среду настолько усилилось, что существующие наземные методы слежения за ее состоянием перестали удовлетворять современным требованиям учета ресурсов биосферы и управления ее развитием [1]. Использование данных спутникового дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) позволяет обеспечить практически непрерывный мониторинг атмосферы, земной и водной поверхностей, что, несомненно, является актуальной задачей. Целью настоящей работы является изучение применения данных спутниковых наблюдений TERRA-MODIS и ГИС-технологий для оперативного мониторинга состояния окружающей среды нефтедобывающих территорий Томской области.

Объект исследования

Объектом исследования в данной работе является растительный покров территории Томской области, расположенной в юго-восточной части Западно-Сибирской равнины. Площадь Томской области составляет 314,4 тыс. км², лесные земли составляют 68,3% общей площади. Область обладает значительными запасами природных ресурсов. Утвержденные запасы нефти составляют 633,87 млн т, газа – 331,1 млрд м³ [2].

Томская область активно развивается в промышленном отношении, в последние годы характеризуется нарастанием напряженности экологической обстановки. Основная причина этого – несоответствие масштабов техногенного воздействия на природную среду и мер по ее сохранению, восстановлению

и охране. Конкретно это выражается в непрерывном нарастании площадей и объемов добычи нефти и газа со степенью выработки месторождений более 50%, использовании старых технологий, наличии опасных ядерно-химических объектов. К осложняющим факторам относится слабый учет устойчивости природных ландшафтов к техногенным воздействиям [3, 4].

При оценке состояния окружающей среды на месторождениях используют различные методы получения информации: наземные данные, данные аэросъемки и спутниковые данные. Вследствие труднодоступности территорий углеводородных месторождений Томской области наиболее перспективным подходом к оперативному мониторингу состояния растительного покрова с использованием спутниковых данных.

Методические вопросы анализа геоданных

В Научно-исследовательском информационном центре ИХН СО РАН сформирована коллекция спутниковых данных MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – сканирующий спектро-радиометр среднего разрешения) для исследуемой территории Томской области за период 2000 - 2015 гг.

Тематические продукты MODIS созданы зарубежными специалистами по результатам обработки КС, полученных со спутника TERRA сканером MODIS и цифровых моделей рельефа. Материалы съемки MODIS имеют широкий спектр применения для исследования атмосферы, водных объектов и суши [5]. Данные MODIS по всей поверхности Земли поступают со спутника TERRA каждые 2 дня в 36 спектральных зонах (в диапазоне 0,405-14,385 мкм) с разрешением 250-1000 м, что обеспечивает моделирование в глобальном и региональном масштабе. Предназначение системы MODIS состоит в сборе данных для калиброванных глобальных интерактивных моделей Земли как единой системы. В будущем предполагается использование интерактивных моделей для прогнозирования глобальных

изменений окружающей природной среды в связи с антропогенными влияниями. Стоит отметить, что материалы MODIS находятся в свободном доступе и позволяют оперативно оценивать состояние окружающей среды, в частности, данные продукта MOD13Q1 (дата съемки с 10.06.2015 по 26.06.2015), необходимые для исследований в этой работе, были доступны уже 01.07.2015 г.

Для работы со спектральной информацией часто прибегают к созданию так называемых «индексных» изображений. На основе комбинации значений яркости в определенных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчета по этим значениям «спектрального индекса» объекта строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что и позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние. Спектральные индексы, используемые для изучения и оценки состояния растительности, получили общепринятое название вегетационных индексов.

Вегетационный индекс (ВИ) – показатель, рассчитываемый в результате операций с разными спектральными диапазонами (каналами) данных дистанционного зондирования и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе снимка. Эффективность ВИ определяется особенностями отражения; эти индексы выведены, главным образом, эмпирически.

Наиболее популярный и часто используемый индекс *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index) – нормализованный разностный индекс растительности, впервые был описан в 1973 г. – простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом), является самым распространенным индексом для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова, и вычисляется по следующей формуле [6]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где *NIR* – коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра; *RED* – коэффициент отражения в красной области спектра.

Расчет *NDVI* базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра (0,6-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7-1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью)

ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной.

Для сопоставления значений индекса *NDVI* с состоянием растительности используется стандартизованная непрерывная дискретная шкала, определяющая значения индекса в диапазоне от минус 1 до 1. Установлено, что для густой растительности значение индекса составляет $NDVI \geq 0,7$, для разреженной растительности значения индекса *NDVI* находятся в диапазоне от 0,3 до 0,5. Для открытой почвы $NDVI = 0,025$, для искусственных материалов и покрытий, производственных грунтов *NDVI* принимает отрицательные значения и примерно равен $NDVI = -0,5$ [6]. Как правило, для задач, связанных с картографированием ареалов распространения различных типов растительности, используют немасштабированную шкалу от 0 и выше, т.к. значения *NDVI* для растительности не могут быть отрицательными.

В данной работе использован тематический продукт TERRA MODIS – MOD13Q1 16-Day Vegetation Indices с разрешением 250 м, содержащий значения нормализованного вегетационного индекса (*NDVI*), усредненного за 16 дней. Анализ значений индекса *NDVI* позволяет выявить проблемные зоны с угнетенной растительностью, давая возможность принимать наиболее верные решения, направленные на улучшение экологического состояния территорий. При помощи статистической обработки ретроспективных данных о значениях индекса *NDVI* помимо определения количества фитомассы можно также выделить территории с угнетенным состоянием растительности. Индекс *NDVI* часто используется как один из инструментов при проведении более сложных видов анализа, в результате чего могут создаваться карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, карты ландшафтов и природных зон, почвенные и другие эколого-климатические карты. Также на его основе возможно получение численных данных для использования в расчетах оценки и прогнозирования урожайности и продуктивности, биологического разнообразия, степени нарушенности и ущерба от различных стихийных бедствий, техногенных аварий и т.д.

Дистанционные исследования и анализ изменения состояния растительного покрова с использованием нормализованного разностного вегетационного индекса

В качестве примера применения данных спутниковых наблюдений TERRA-MODIS для мониторинга состояния окружающей среды нефтедобывающих территорий были проанализированы территории четырех месторождений Томской

области – Крапивинское, Мыльдзинское, Лугинецкое и Урманское (рис. 1).

Дополнительно, в качестве фонового участка, была исследована территория Государственного природного заказника областного значения «Оглатский», площадь которого составляет 100 тысяч гектаров. Главным достоянием данного заказника являются лесные массивы Каргасокского района Томской области, где из всех лесных формаций настоящими доминантами являются смешанные леса.

Средствами геоинформационной системы ArcGis 10.2.2 для территорий четырех месторождений и территории заказника «Оглатский» по тематическому продукту MOD13Q1 рассчитано среднее значение NDVI за период с 2010 по 2015 г.

На рис. 2 показано координатная сетка MODIS с отдельными элементами, четыре из которых («21-02», «22-02», «21-03» и «22-03», где первая пара цифр указывает номер элемента по горизонтали, а вторая пара цифр – номер элемента по вертикали), полностью охватывают территорию Томской области.

Как видно из рис. 2, исследуемые месторождения и фоновый участок (заказник) расположены

в секторе №22-03. Следовательно, анализ данных тематического продукта MOD13Q1 проводился только для указанного элемента координатной сетки за 6-летний период (2010–2015 гг.) для 161 дня за 16-дневный период (с датами съемки с 10 июня по 26 июня каждого года).

Известно, что *NDVI* значения пикселей для снимков MODIS имеют масштабный коэффициент равный 10 000. Поэтому для получения стандартных значений *NDVI* от минус 1 до 1 был использован инструмент «Калькулятор растров», в котором каждый растровый слой делился на масштабный коэффициент.

Расчет среднего значения индекса *NDVI* для исследуемых территорий осуществлялся с помощью инструмента «Зональная статистика по таблицам» (рис. 3), в котором необходимо выбрать растровый слой, полигональный слой, над которым будет производиться расчет, поле в таблице, по которому объекты будут разделены, а также тип нужной статистики. В результате расчета в таблицу атрибутов векторного слоя добавляется поле Mean – среднее значение *NDVI* соответственно. На рис. 3 приведен

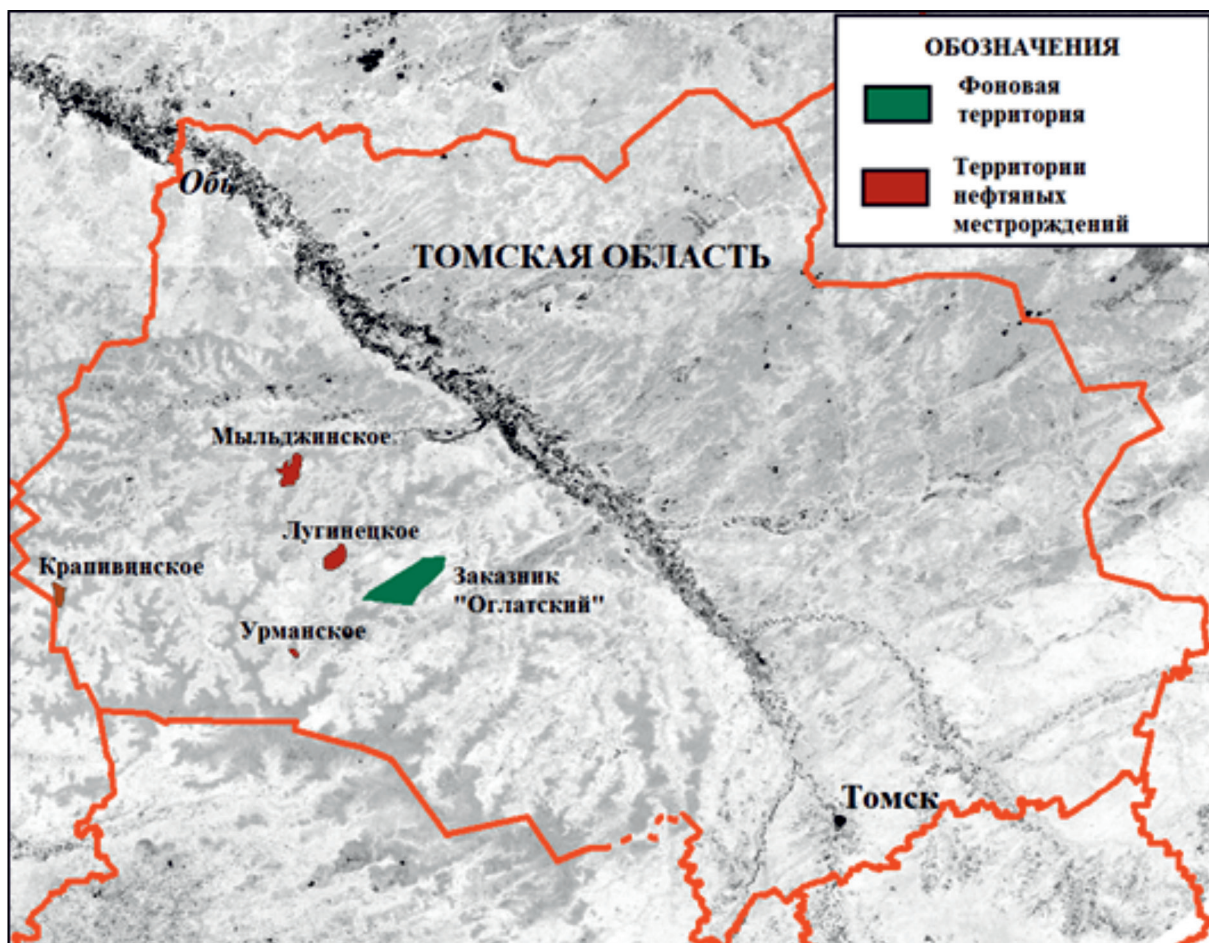


Рис. 1. Исследуемые территории

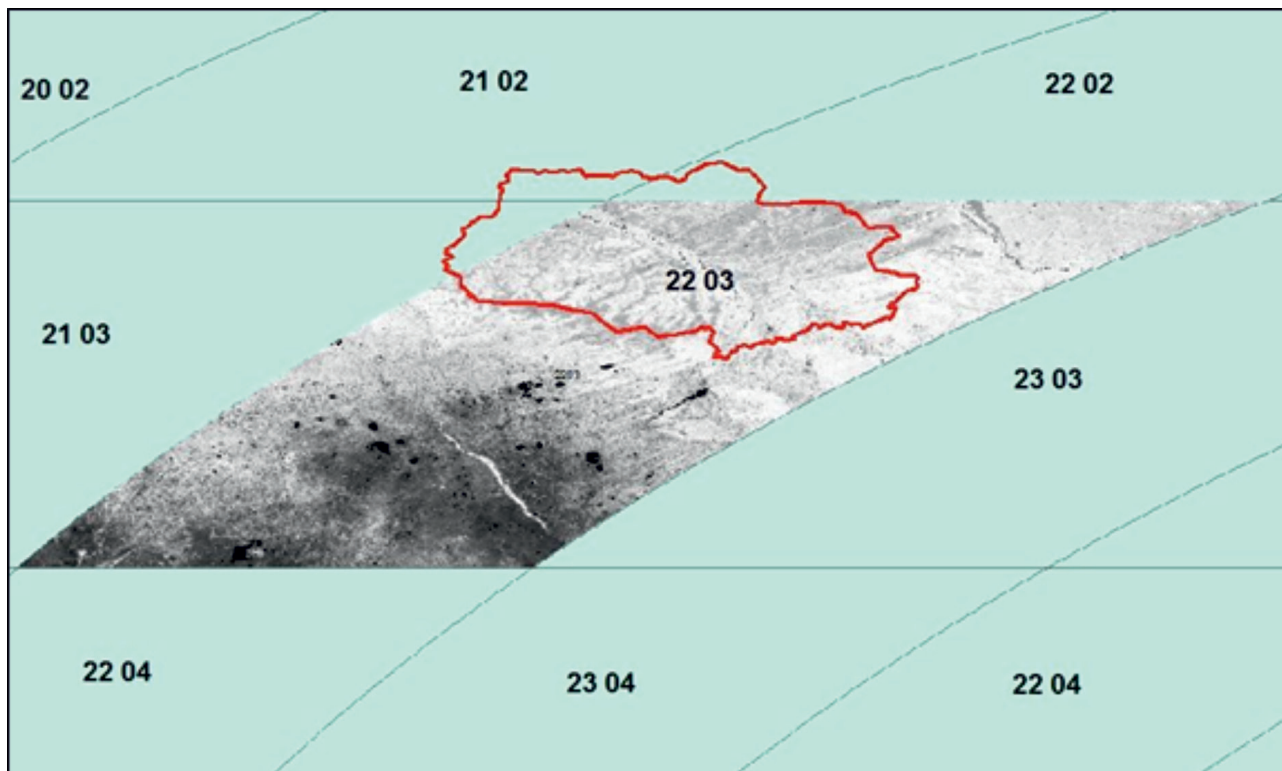


Рис. 2. Фрагменты съемки MODIS для исследуемой территории

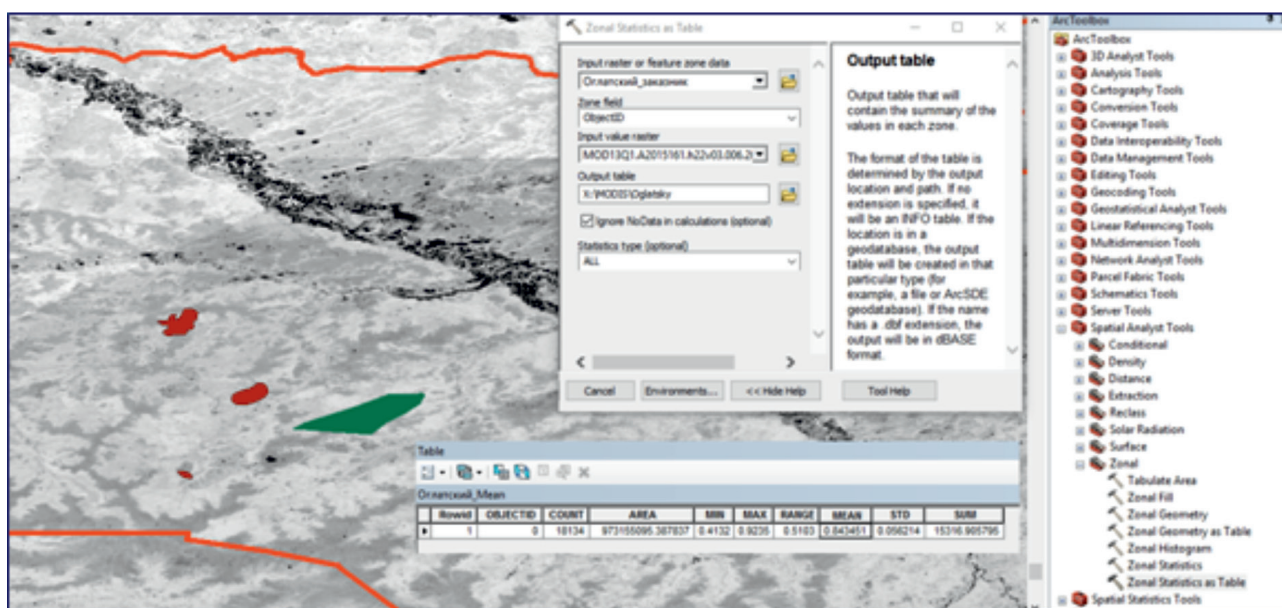


Рис. 3. Расчет среднего значения *NDVI* территории заказника «Оглатский»

пример расчета среднего значения индекса *NDVI* по тематическому продукту MOD13Q1 территории заказника «Оглатский» (161 день 2015 г.).

В табл. 1 приведены средние значения индекса *NDVI* всех исследуемых территорий за 6-летний период (2010-2015 гг.) для 161 дня за 16-дневный период (с датами съемки с 10 июня по 26 июня каждого года).

Для наглядности и проведения сравнительного анализа значений индекса *NDVI* результаты расчетов

были отображены в графическом виде (рис. 4). Как видно из рис. 4, максимальное значение вегетационного индекса $NDVI = 0,847$ соответствует состоянию растительного покрова фонового участка (территория заказника «Оглатский») в 2011 г.

Стоит отметить, что для всех исследуемых территорий тенденции изменения значений индекса однотипны: высокие значения – в 2011 и 2015 гг., минимальные значения – в 2010 и 2013 гг.,

Таблица 1

Средние значения индекса *NDVI* исследуемых территорий

Год	Крапивинское	Лугинецкое	Мыльджинское	Урманское	Заказник «Оглатский»
2010	0,717	0,771	0,696	0,781	0,804
2011	0,747	0,818	0,705	0,797	0,847
2012	0,699	0,776	0,708	0,774	0,799
2013	0,692	0,769	0,669	0,783	0,787
2014	0,694	0,775	0,705	0,791	0,794
2015	0,801	0,824	0,783	0,844	0,843

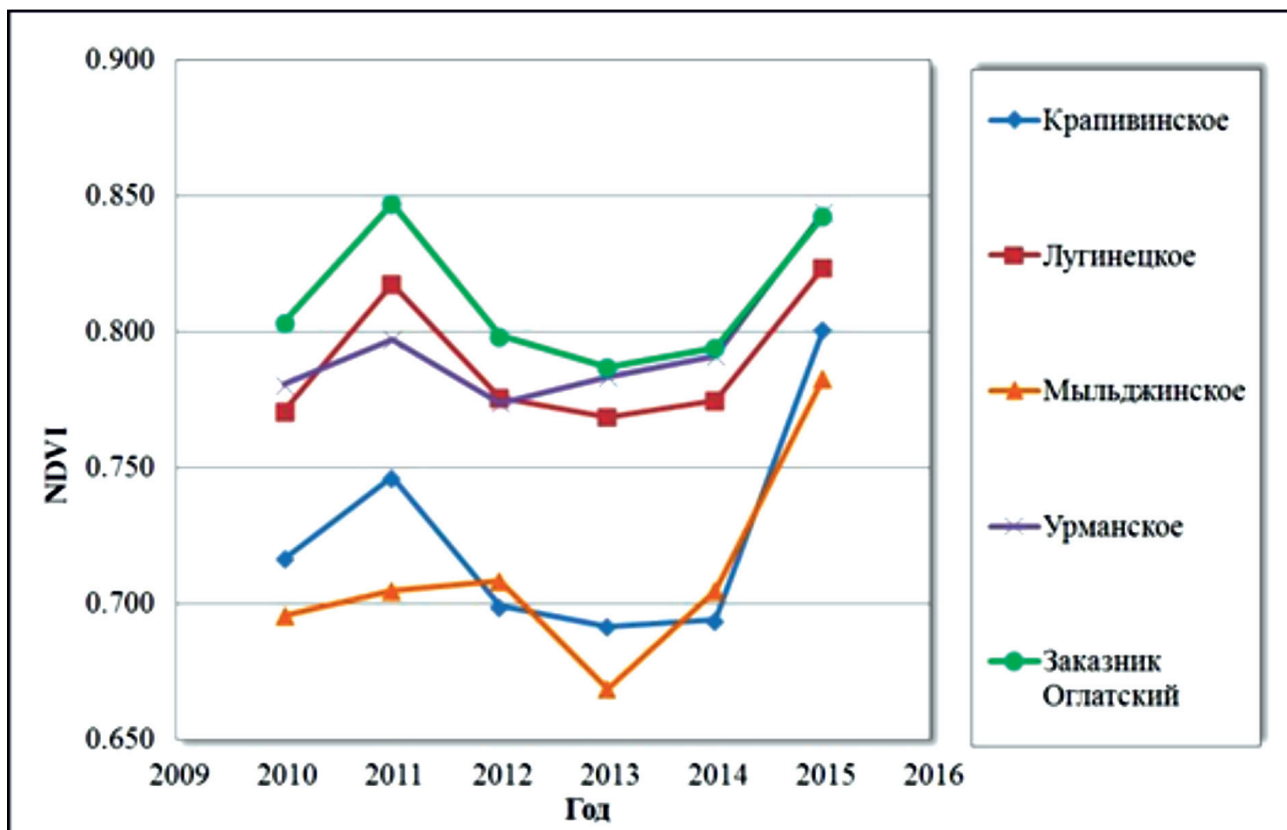


Рис. 4. Динамика изменения значений нормализованного вегетационного индекса

за исключением территории Мыльджинского месторождения (рис. 5). Такая согласованность может быть объяснена тем, что, например, в 2010 г. в Томской области был высокий уровень паводка и масштабное затопление, что способствовало естественному смыву нефтепродуктов с нефтезагрязненных земель месторождений и хорошему развитию растительного покрова на следующий год. А вычисленные относительно низкие значения индекса в 2013 г. могут быть обусловлены тем фактом, что лето 2013 г. началось с вторжения холодного арктического воздуха, в результате чего пониженный температурный фон июня с частыми осадками сказался на задержке в развитии растительности [7]. Средняя температура

воздуха за июнь 2013 г. составила плюс 13-15 °С, что ниже нормы на 1-2 °С и ниже средних значений за 2012 г. на 7-8 °С.

Для более детального анализа полученных результатов значения индекса *NDVI* были представлены в виде линейных трендов (рис. 5).

Как видно из рис. 5, значение *NDVI* = 0,844 в 2015 г. для растительного покрова месторождения Урманское почти совпадает со значением вегетационного индекса фонового участка. Данное месторождение относится к «молодым» месторождениям Томской области, введено в эксплуатацию в 2006 г. Ранее нами была выявлена тенденция изменения количества аварийных отказов и площади нефте-



Рис. 5. Анализ изменения *NDVI* для каждой исследуемой территории

загрязненных земель от года ввода в эксплуатацию месторождения.

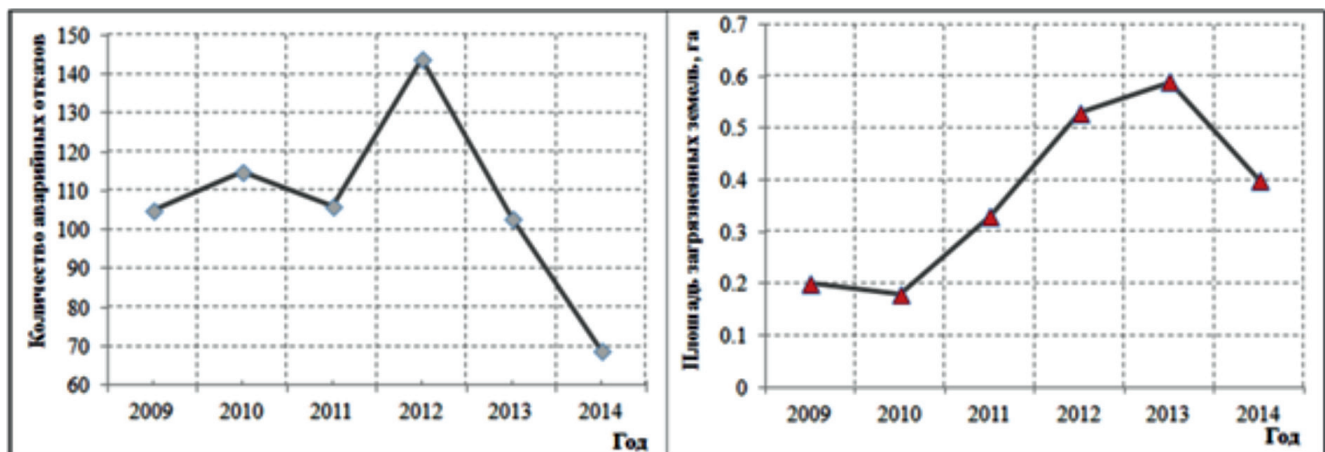
Установлено, что загрязнение земель и водоемов обусловлено высокой аварийностью «старых» месторождений, которых на территории Томской области абсолютное большинство. На объектах нефтегазодобывающего комплекса Томской области в 2012 г. зарегистрирован 601 аварийный отказ оборудования (423 отказа на нефтепроводах, 176 – на водоводах, 2 на газопроводах). Основное количество отказов произошло на нефтепроводах и водоводах в результате коррозии труб и повышения интенсивности эксплуатации месторождений. В табл. 2 представлены данные о количестве отказов на нефтедобывающих объектах, а также площади нефтезагрязненных земель. Результаты приведены, как для некоторых «старых» месторождений, срок эксплуатации которых превышает 20-40 лет, так и для «молодых» месторождений Урманское, Майское и Фестивальное, которые введены в эксплуатацию в 2006-2007 гг. [8].

Проведен анализ количества аварийных отказов (рис. 6а) и площади нефтезагрязненных земель

(рис. 6б) для территории Лугинецкого месторождения с 2009 по 2014 гг. [7, 8]. Как видно из рис. 6а и табл. 2, наибольшее число аварий за указанный период на территории Лугинецкого месторождения произошло в 2012 г. – 144 случая, а в 2014 г. количество аварий было минимальным – 69 случаев, что согласуется с изменениями значений *NDVI* для растительности Лугинецкого месторождения (рис. 4), в частности состояние растительного покрова начиная с 2012 г. по 2014 г. было наихудшим и значения индекса минимальны, а с 2014 г. значение индекса увеличивается при уменьшении количества аварий практически в 2 раза. Аналогичные зависимости проявляются при анализе графика на рис. 6б – в 2010 г. наблюдается минимальная территория нефтезагрязнения, соответственно растительность характеризуется хорошим состоянием на следующий 2011 год, что подтверждает высокое значение индекса на рис. 4 для территории Лугинецкого месторождения. Большая площадь загрязнения, начиная с 2012 г. и особенно в 2013 г. с максимальной площадью нефтезагрязнения (0,69 га), соответственно оказала влияние на состояние

Количество отказов оборудования и площади нефтезагрязненных земель на месторождениях Томской области в 2012 г.

Месторождение	Год введения в эксплуатацию	Количество отказов	Площадь нефтезагрязненных земель, га
Советское	1966	102	0,28
Первомайское	1981	53	0,43
Катыльгинское	1983	26	0,17
Лугинецкое	1985	144	0,53
Ломовое	1986	44	0,22
Игольско-Таловое	1991	26	0,18
Мыльджинское	1999	Нет данных	Нет данных
Крапивинское	1999	37	0,03
Урманское	2006	–	–
Майское	2007	–	–
Фестивальное	2007	–	–



а

б

Рис. 6. Количество аварийных отказов (рис. 6а) и площадь нефтезагрязненных земель (рис. 6б) для территории Лугинецкого месторождения с 2009 по 2014 г.

растительности в эти годы – значения $NDVI$ для растительности рассматриваемого месторождения самые низкие в 2013 г. Далее в 2014 г. произошло сокращение количества аварий и площади загрязненных земель, что соответственно отразилось на значении индекса – он увеличился в 2015 г. Таким образом, показана прямая зависимость между количеством аварий, площадью нефтезагрязнений и состоянием растительного покрова на территории нефтедобывающего предприятия.

Самое минимальное значение индекса $NDVI=0,669$ вычислено для растительности на территории

Мыльджинского газоконденсатного месторождения в 2013 г. Из открытых литературных источников нам не удалось установить аварийную ситуацию на территории данного месторождения. Проведенный нами анализ показал угнетенное состояние растительного покрова территории Мыльджинского месторождения.

Для выявления факторов, вызвавших падение индекса в 2013 г., необходимо проведение более детального исследования с помощью космических снимков высокого пространственного разрешения. Например снимков со спутника Landsat 8, где зона 5

«Ближняя инфракрасная» позволяет определять типы растительности и может использоваться в комбинации с 6-й зоной «Коротковолновая инфракрасная» для вычисления нормализованного разностного вегетационного индекса *NDVI*. Все перечисленные данные собираются с 30-метровым разрешением.

В целом для территорий всех исследуемых месторождений наблюдается возрастание индекса с 2014 г., что свидетельствует о хорошем (неугнетенном) состоянии растительности и улучшении экологической обстановки.

Заключение

Применение спутниковых данных и ГИС-технологий позволило проанализировать состояние растительного покрова труднодоступных нефтедобывающих территорий Томской области, что оказывает значительную помощь в своевременной оценке экологической ситуации и принятии решений в устранении и профилактике загрязнения окружающей среды. Мониторинговые исследования включали анализ состояния ландшафтов нефтедобывающих территорий, учет климатических факторов, количество аварийных отказов и размеры площадей загрязненных земель.

Практическое применение тематических продуктов MODIS для мониторинга состояния окружающей среды нефтедобывающих территорий четырех месторождений Томской области позволило определить угнетенное состояние растительности в 2013 г. для территории Крапивинского, Лугинецкого, и Мыльджинского месторождений, а также выявить улучшение со временем экологического состояния растительности всех исследуемых территорий. Проведен сравнительный анализ вычисленных значений вегетационного индекса растительного покрова месторождений с состоянием растительности фонового участка, в качестве которого выбран Государственный природный заказник Томской области «Оглатский».

Ключевые слова: окружающая среда, космические снимки, геоинформационные системы, месторождения нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солодовников А.Ю. Устойчивость и экологический риск в процедуре оценки воздействия нефтегазовых объектов на окружающую среду: теоретический аспект // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. Выпуск 3. – Тюмень : ИПОС, 2002. – С. 33-42.
2. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2015 году» / глав. ред. С.Я. Трапезников, редкол.: Ю.В. Лунёва, Н.А. Чатурова ; Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области ; ОГБУ «Облкомприрода». – Томск : Дельтаплан, 2016. – 156 с.
3. Перемитина Т.О., Алексеева М.Н., Ященко И.Г. Оценка влияния нефтеразливов на состояние растительного покрова и приземного слоя атмосферы с использованием космических снимков // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24, № 7. – С. 606-610.
4. Altunina L.K., Svarovskaya L.I., Alekseeva M.N., Yashchenko I.G. Integrated Assessment of Anthropogenic Contamination of Oil-Producing Territories in Western Siberia // Petroleum Chemistry. – 2014. – Vol. 54, № 3. – P. 234-238.
5. Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В. Анализ региональных спутниковых Данных MODIS Products // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 336-342.
6. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 28-32.
7. Экологический мониторинг : доклад о состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2013 году / глав. ред. А.М. Адам, редкол.: В.А. Коняшкин, И.Г. Тарасов, Ю.В. Лунева ; Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области ; ОГБУ «Облкомприрода». – Томск : Дельтаплан, 2014. – 194 с.
8. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2014 году» / глав. ред. С.Я. Трапезников, редкол.: Ю.В. Лунёва, Н.А. Чатурова, В.А. Коняшкин ; Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области ; ОГБУ «Облкомприрода». – Томск : Дельтаплан, 2015. – 156 с.