

Электромагнитный спектр светового потока для оценки антропогенного загрязнения растительности на территории нефтедобывающих комплексов

Л.И. Сваровская, И.Г. Яценко, Л.К. Алтунина*

*Институт химии нефти СО РАН
634021, г. Томск, пр. Академический, 3*

Поступила в редакцию 22.11.2012 г.

Для оценки загрязнения растительного покрова на локальной труднодоступной заболоченной территории изучаемых месторождений рассчитан нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI) на основе геоинформационных данных спутниковой системы ERDAS Imagine, ArcView, ArcGIS. Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность. Значения NDVI определяли по отношению разности интенсивности отраженного света в инфракрасном и красном диапазонах света. Полученные значения подтверждены данными физико-химических и микробиологических анализов проб, отобранных на загрязненных территориях в период 1999–2007 гг.

Ключевые слова: нефтезагрязнение, биоценоз, биодеструкция, геоинформационные технологии, нормализованный вегетационный индекс; oil pollution, biocenosis, biodegradation, geoinformation technologies, Normalized Difference Vegetation Index.

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, которая характеризуется большими различиями в отражении излучения разных длин волн, что позволило использовать космические снимки (КС) для оценки состояния экологической системы заболоченных северных территорий Сибири.

На нефтедобывающих предприятиях Западно-Сибирского региона примерно 70% территории приходится на труднодоступные болота, которые являются регуляторами водного режима, обеспечивают существование характерной флоры и фауны, представляют ресурс, имеющий экономическое и рекреационное значение. Аварийные ситуации на магистральных и промысловых нефтепроводах, проложенных по заболоченной местности, сопровождаются значительными выбросами нефти и сопутствующей высокоминерализованной пластовой воды, что губительно действует на все компоненты ландшафта. В результате аварий загрязнено от 700 до 840 тыс. га площади Западной Сибири, основной причиной которых являются изношенность и коррозия скважинного оборудования и нефтепроводов [1]. Потери нефти в результате аварий достигают 3–5% от ежегодной добычи.

Самовосстановление экосистемы как следствие химических и микробиологических процессов, особенно в северных районах, проходит крайне медленно, в течение 5–10 лет, в зависимости от концентрации

загрязнения и температуры окружающей среды [2]. Процессы химического и микробиологического окисления углеводородов представляют собой, с теоретической точки зрения, положительный катализ. При этом действует один и тот же агент-окислитель — молекулярный кислород воздуха. Далее можно отметить, что тот и другой виды окисления носят характер цепных процессов и ферментативные системы микробной клетки можно рассматривать как катализаторы. Концентрация загрязнения имеет значение при выборе экологически безопасных методов восстановления нефтезагрязненных почв.

При загрязнении почвы в концентрации до 10% численность почвенной микрофлоры после периода адаптации постепенно увеличивается за счет углеводородокисляющей микрофлоры, потребляющей углеводороды нефти в качестве источника питания и энергии. В этом случае микробиологический метод восстановления нефтезагрязненных почв разрабатывается на основе ферментативной активности микроорганизмов, стимулированных питательными субстратами, с применением агротехнических приемов, улучшающих доступ кислорода, необходимого для окислительных процессов [3].

При более высокой концентрации нефти, загрязняющей почву, требуются внесение биопрепарата, содержащего активную углеводородокисляющую микрофлору, и комплекс агротехнических мероприятий (рыхление, внесение питательных субстратов, поддержание влажности). Для загрязненных водных объектов и заболоченных территорий применяются биопрепараты, содержащие активную углеводородокисляющую микрофлору, иммобилизованную на сорбенте, удельный вес которого меньше воды [4].

* Лидия Ивановна Сваровская (sli@ipc.tsc.ru); Ирина Германовна Яценко; Любовь Константиновна Алтунина (alk@ipc.tsc.ru).

Биопрепарат на основе субстрата-носителя с плотностью меньше единицы не тонет, за счет чего микробы-деструкторы находятся в контакте с загрязняющими углеводородами, что способствует более полной очистке водной поверхности.

На территории месторождений со временем накапливаются тысячи тонн нефтешламов, рекультивация которых в условиях Севера затруднена и зависит от концентрации загрязняющих нефтепродуктов [5]. Труднодоступность и заболоченность территорий нефтедобывающих предприятий не позволяют своевременно оценить масштаб загрязнения и принять план рекультивационных мероприятий.

Цель нашей работы состоит в применении геоинформационных систем и методов дешифрирования КС для оценки антропогенного загрязнения растительного покрова и проведении сравнительного анализа с данными наземных исследований на территории Самотлорского и Ватинского месторождений Западной Сибири, а также в определении степени риска сети магистральных и промысловых нефтепроводов.

Методы

Для оценки антропогенного загрязнения растительного покрова труднодоступной заболоченной территории нефтедобывающих комплексов использовали космические снимки, на основе которых рассчитывали нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI). Растительность преимущественно поглощает солнечную радиацию в видимом красном диапазоне (0,58–0,68 мкм) солнечного спектра, отражает и рассеивает ее в инфракрасном диапазоне (0,73–1,1 мкм). При разливе нефти во время аварийной ситуации электромагнитный световой спектр наземной растительности изменяется в зависимости от ее состояния. Индекс NDVI определяется как нормированная разность яркостей изображения растительного покрова в красном (f_1) и инфракрасном (f_2) диапазонах. Значения этой величины определяются в интервале от -1 до $+1$ по формуле $NDVI = (f_2 - f_1) / (f_1 + f_2)$.

Полученные значения NDVI сравнивались с данными физико-химических и микробиологических анализов проб грунта и воды, отобранных на загрязненной площади Самотлорского и Ватинского месторождений Ханты-Мансийского автономного округа в период 1999–2007 гг.

Концентрацию нефти, загрязняющей воду, почву и растения, исследовали методом экстракции хлороформом с применением аппарата Сокслета [6]. Динамику численности углеводородокисляющей микрофлоры, утилизирующей загрязняющую нефть, определяли методом посева проб воды и подготовленной пробы почвы на мясо-пептонную агаровую среду [7]. Изменения в составе и концентрации углеводородов нефти исследовали методом хроматографии и хромато-масс-спектрометрии [8].

Результаты и их обсуждение

Основными загрязненными экосистемами изучаемых месторождений являются обводненные болота, на которые приходится 86% всей площади. Картографирование участков промысловых и магистральных нефтепроводов, проходящих по болотистой территории, и зон их неблагоприятного влияния на почвенно-растительный покров осуществляли с использованием средств геоинформационных систем ERDAS Imagine и ArcGIS по схеме, приведенной на рис. 1, из которого следует, что построение контуров болот осуществляли в несколько этапов.

На первом этапе проводили классификацию «с обучением» космических снимков и их векторизацию. На втором этапе генерализацию классифицированного КС проводили с помощью фильтров обнаружения и замены неправильно классифицированных пикселей средними значениями и путем удаления векторных контуров болот малого размера по сравнению с масштабом карты.

С использованием схемы сети промысловых и магистральных нефтепроводов выделены участки возможных аварий и зоны риска загрязнения нефтью почвенно-растительного покрова. На обводненной

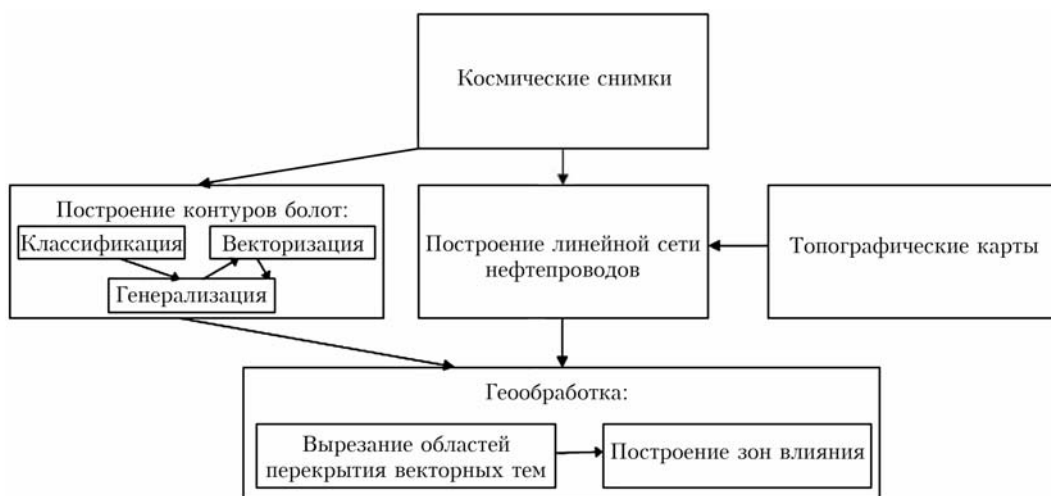


Рис. 1. Схема картографирования участков нефтепроводов и зон их влияния на почвенно-растительный комплекс

болотистой местности из-за малой пересеченности рельефа, незначительных уклонов профиля труб магистральных нефтепроводов и больших расстояний между линейными задвижками, составляющими от 20 до 30 км, при аварийных ситуациях загрязнение охватывает значительные площади. Примерная зона загрязнения по обе стороны нефтепровода измеряется от 200 м для наземного участка до 3 км для перехода через водную преграду.

Для количественной оценки состояния растительного покрова на территории разлива нефти Самотлорского и Ватинского месторождений исследования проводили в период с 1999 по 2007 г. На основе космических снимков Landsat рассчитывали значения нормализованного вегетационного индекса NDVI, которые отражают состояние нарушенной экологической системы. В красной области спектра находится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, в инфракрасной области спектра – максимум отражения клеточными структурами пластинки листа растений. Как правило, для подстилающей поверхности зеленой травяной растительности f_2 всегда больше f_1 , поэтому значения NDVI положительные и составляют 0,5–0,7, для разреженной растительности – 0,03, для погибшей при разливе нефти – минусовые значения (рис. 2). Следовательно, величина NDVI является интегральным показателем вегетационной активности наземной растительности после ряда мероприятий по очистке загрязненной территории.



Рис. 2. Значения NDVI на загрязненных территориях изучаемых месторождений в период 1999–2007 гг.

Как следует из рис. 2, отрицательные значения индексов NDVI за 1999–2000 гг. соответствуют почти полной гибели растительного покрова в результате разлива нефти и минерализованной пластовой воды. Концентрация нефтезагрязнения на территории погибшей растительности составила 42–49%.

Физико-химические и микробиологические исследования на территории нефтеразливов

После аварии на территории Самотлорского и Ватинского месторождений в 1999 г. концентрация загрязнения грунта нефтью составила 47–49%,

водной поверхности болота – 38–41,3%, толщина пленки нефти на поверхности воды – от 1,35 до 2,5 мм.

Пластовые воды, сопутствующие нефти, с минерализацией от 17,2 до 34,6 г/л, содержат богатый и разнообразный биоценоз. Содержание ионов Cl^- составляет от 14,3 до 25, ионов Na^+ от 8,9 до 15,5 г/л, фосфатов 0,4–14,2, сульфатов до 46,7 мг/л, сероводорода 0,06, бикарбонатов 0,32 и солей тяжелых металлов 0,94 г/л. Показатели отношения Ca/Mg и I/Br составляют соответственно 1,9 и 0,87. В отличие от нефтяного загрязнения разливы минерализованных вод, как правило, вызывают полную гибель древесной и травянистой растительности в течение одного-двух вегетационных периодов. Все это губительно сказалось на численности биоценоза, который при отсутствии рекультивационных мероприятий к 2000 г. не восстановился.

Микробиологический анализ проб болотной воды, загрязненного грунта и растительного покрова, отобранных в 1999–2000 гг., показал снижение численности изучаемых групп микроорганизмов в 4–5 раз по сравнению с фоновым уровнем. К 2001 г. число микроорганизмов увеличилось на 1–2 порядка, деструкция загрязняющей нефти составила 12%, что оказало положительное влияние на процесс восстановления растительности. Вегетационный индекс к 2001 г. имел положительные значения (рис. 2). К 2007 г. в загрязненной почве и болотной воде численность почти всех бактериальных сообществ, в том числе углеводородокисляющих бактерий, увеличилась на 3–4 порядка. Активизировались деструктивные процессы, почти на 50–65% понизилась концентрация нефтепродуктов, заметно восстановилась растительность.

Нефть, экстрагированную из проб, отобранных на загрязненных участках в разные периоды времени, исследовали методом ИК-спектрометрии. По данным оптических плотностей ИК-спектров рассчитаны спектральные коэффициенты относительной интенсивности полос поглощения, отражающих деструктивные процессы (таблица).

Спектральные коэффициенты по данным ИК-спектрометрического анализа нефти, экстрагированной из проб загрязненной почвы

Спектральные коэффициенты (C_{1-4})	Исследуемый период времени, год			
	1999	2000	2001	2007
$C_1 = (D_{1610}/D_{720})$, ароматичность	0,74	0,73	0,79	1,58
$C_2 = (D_{750}/D_{720})$, интенсивность поглощения полициклических аренов и <i>n</i> -алканов	1,03	1,00	1,15	1,95
$C_3 = \text{CH}_3/\text{CH}_2 (D_{1380}/D_{720})$, разветвленность парафиновых структур	2,3	2,3	3,52	13,01
$C=O - (D_{1710}/D_{1600})$, интенсивность накопленных продуктов окисления	0,45	0,43	0,56	2,74

Примечание. D – оптическая плотность полосы поглощения валентных колебаний: ароматических структур в области 1610 см^{-1} , *n*-алканов – группа CH_2 в области 720 см^{-1} , полициклических аренов в области 750 см^{-1} , метильной группы CH_3 в области 1380 см^{-1} , кислородсодержащих продуктов метаболизма в области 1710 см^{-1} .

Согласно данным таблицы, незначительное увеличение коэффициентов отмечено в 2001 г. и более значимые изменения – в 2007 г. Например, коэффициенты C_1 и C_2 увеличились почти в 2 раза. Коэффициенты окисленности ($C=O$) и разветвленности C_3 , определяющие накопление кислородсодержащих продуктов метаболизма и изменение величин поглощения спектров в области изоалканов (1380 см^{-1}) и нормальных алканов (720 см^{-1}), увеличились в 6 раз, что свидетельствует об активных деструктивных изменениях, способствующих самоочищению нефтезагрязненной среды.

Результаты микробиологических наземных исследований, проведенные в разные годы после разлива нефти и пластовой воды, подтверждают выводы, полученные при расчете индексов NDVI. Следовательно, анализ труднодоступной территории, загрязненной при аварийном разливе нефти и пластовой воды, с помощью дистанционных методов, основанных на отражательных свойствах растительного покрова, позволяет получить точные данные о негативном воздействии на окружающую среду.

Таким образом, применение геоинформационных технологий и нормализованного вегетационного индекса NDVI для оценки состояния загрязненной территории нефтедобывающих комплексов и динамики восстановления растительного покрова значительно сократит время и экономические расходы на проведение мониторинговых исследований загрязненных труднодоступных заболоченных территорий и своевременно позволит разработать план рекуль-

тивационных мероприятий для восстановления нарушенных экологических систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 11-05-98023 р-Сибирь-а.

1. *Пиковский Ю.И.* Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1993. 385 с.
2. *Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.
3. *Сваровская Л.И., Алтунина Л.К.* Активность почвенной микрофлоры в условиях нефтяных загрязнений // Биотехнология. 2004. № 3. С. 63–69.
4. *Биопрепарат* для очистки почвы и воды от нефти и нефтепродуктов: Пат. № 2361686. Россия, МКП В09С1/10 С02F3/34 С12N1/26. Сваровская Л.И., Писарева С.И., Алтунина Л.К.; Ин-т химии нефти СО РАН. № 2007130911/13; Заявл. 13.08.2007; Опубл. 20.07.2009. Бюл. № 20.
5. *Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Филатов Д.А.* Комплексный метод рекультивации нефтешламов с целью восстановления нарушенной природной среды нефтедобывающих территорий // Нефтепереработка и нефтехимия. 2011. № 2. С. 38–41.
6. *Другов Ю.С., Родин А.А.* Анализ загрязненной почвы и опасных отходов: Практическое руководство. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. 424 с.
7. *Романенко В.И., Кузнецов С.И.* Экология микроорганизмов пресных водоемов: Лабораторное руководство. Л.: Наука, 1974. 23 с.
8. *Лабораторное* руководство по хроматографическим и смежным методам / Под ред. О. Микеша. М.: Мир, 1982. Ч. II. 381 с.

L.I. Svarovskaya, I.G. Jashchenko, L.K. Altunina. **Electromagnetic spectrum of light flow for estimation of anthropogenic pollution of vegetation on areas of oil-extraction complexes.**

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was calculated based on GIS data of the satellite system ERDAS Imagine, ArcView, ArcGIS to assess pollution of vegetation cover in local rough swamp territories in oil fields under study. Spectral reflectance is a characteristic feature of vegetation and its condition. NDVI values were determined by the ratio of the difference in reflected light intensities in infrared and red regions. The values obtained were corroborated by physicochemical and microbiological analyses of the samples taken in polluted territories during 1999–2007.